

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Novo paradigma para compensação do fator de potência  
(Versão Pública)**

Tobias Rodrigues Silvestre Conde

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor Hugo dos Santos Marques (FCUL)  
Engenheiro António Manuel Sequeira Abreu (LNEG)



**Novo paradigma para compensação do fator de potência**



## Agradecimentos

A realização da presente dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Ao Engenheiro António Manuel Sequeira Abreu pela sua coorientação, total apoio, disponibilidade, partilha de saber, opiniões e críticas. Pela total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo no desenvolvimento deste trabalho, que muito elevaram os meus conhecimentos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor.

Ao Professor Doutor Hugo dos Santos Marques, o meu sincero agradecimento pela orientação, profissionalismo e pela total disponibilidade que sempre revelou para comigo. O seu apoio foi determinante na elaboração desta Tese.

Aos colegas de estágio, à Dr.<sup>a</sup> Alexandrina Fernandes e ao Sr. Joaquim Milheiro, colaboradores do LNEG, por terem sido essenciais no decurso e finalização dos trabalhos desenvolvidos ao longo do estágio.

Aos meus amigos Pedro Barbosa e Teresa Domingues, um muito obrigado pela vossa amizade, companheirismo e ajuda, fatores muito importantes ao longo de todo o percurso académico e que me permitiram que cada dia fosse encarado com particular motivação.

À Mafalda Vicente pelo modo como me apoiou e acompanhou ao longo desta árdua caminhada. Sempre que necessário soube aconselhar e soube criticar, como sempre e em tudo na vida. Pelas alegrias, momentos felizes, desânimos, angústias e essencialmente pela compreensão.

Tendo consciência que sozinho nada disto teria sido possível, dirijo um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, por serem modelos de uma tremenda coragem, pelo seu apoio incondicional, incentivo, amizade e paciência demonstrados e total ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. A eles dedico este trabalho.



## Resumo

Nas últimas décadas tem-se vindo a observar um aumento progressivo do consumo de energia elétrica que, consequentemente, está associado a uma maior utilização dos recursos endógenos. Em Portugal, nos últimos anos, o desenvolvimento de projetos e iniciativas que promovem a eficiência energética e que conduzem aos objetivos propostos no horizonte 2020 são cada vez mais frequentes. A compensação da energia reativa é uma das medidas que apresenta uma maior relevância em termos de redução dos consumos e de custos energéticos, o que faz dela, por via da sua natureza, uma das medidas mais implementadas.

Esta dissertação apresenta uma metodologia para compensação do fator de potência, caracterizada por uma nova forma de exploração do parque de baterias de condensadores, que se revelou mais eficaz e eficiente para a redução de consumos, respondendo às solicitações do Plano Nacional de Eficiência Energética. O processo aqui apresentado destaca-se pela sua contribuição para a segurança das instalações elétricas, instalações de AVAC (instalações eletromecânicas), instalações de emergência, qualidade de energia elétrica e melhor utilização dos recursos naturais.

O desenvolvimento deste trabalho surgiu na sequência de um estágio realizado no Campus do LNEG-Alfragide, cujo tema se encontrava relacionado com a redução dos consumos e a promoção de eficiência energética. Neste contexto, evidenciaram-se os problemas inerentes ao trânsito de energia reativa na instalação e conteúdo harmónico, onde se obteve a resolução dos mesmos através da adoção de práticas e comportamentos inovadores, por meio da reutilização dos equipamentos existentes ou utilização de outros de baixo custo.

Palavras-chave: Energia reativa, distorção harmónica, eficiência energética, racionalização energética.





## Abstract

During these last decades we have been watching a progressive increase in the electric power consumption which has a related impact in the natural resources use. In Portugal, during the last years, the development of projects and initiatives that promote energy efficiency and lead to the Horizon 2020's goals accomplishment are becoming more frequent. The reactive power compensation is one of the measures that has a major importance in terms of the reduction of the energy cost and consumption, what make it, due to its nature, one of the most implemented procedures.

This dissertation presents a methodology for power factor compensation, characterized by a new form of exploitation of a capacitor batteries banks, which has revealed itself more effective and efficient concerning to decreasing consumptions, thereby responding to the National Plan for Energy Efficiency's demands. The process shown in this document stands out for its contribution in the electrical systems safety, in HVAC systems (mechanical), in emergency systems, to electrical energy quality and for a better natural resources use.

The development of this work results from an internship that took place on LNEG - Alfragide's Campus, where the main subject was related with consumption reduction and energy efficiency promotion. In this context, the problems related to reactive power transit and the harmonic content on this facility were identified, and it was expected to solve those by adopting innovative behaviors and procedures, by means of existent material's reutilization or low-cost equipments usage.

**Keywords:** Reactive Power, Harmonic distortion, energy efficiency, energy saving.



# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>XV</b>
1.1	ENQUADRAMENTO .....	1
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....	3
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	4
<b>2</b>	<b>CONCEITOS TEÓRICOS .....</b>	<b>7</b>
2.1	GRANDEZAS SINUSOIDAIS .....	7
2.2	REGIME FORÇADO ALTERNADO SINUSOIDAL .....	9
2.2.1	<i>Impedância e reatância.....</i>	<i>9</i>
2.2.2	<i>Potência elétrica .....</i>	<i>10</i>
2.2.3	<i>Origem da energia reativa.....</i>	<i>12</i>
2.3	REGIMES NÃO SINUSOIDAIS .....	14
2.3.1	<i>Teoria.....</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Classificação das harmónicas .....</i>	<i>16</i>
2.3.3	<i>Origem das harmónicas.....</i>	<i>16</i>
2.3.4	<i>Regulamento para as harmónicas .....</i>	<i>17</i>
2.4	COMPENSAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA .....	17
2.4.1	<i>Em regime sinusoidal.....</i>	<i>17</i>
2.4.2	<i>Em regime não sinusoidal .....</i>	<i>19</i>
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>21</b>
3.1	CONSEQUÊNCIAS DE UM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA.....	21
3.2	CONSEQUÊNCIAS DAS HARMÓNICAS .....	22
3.3	METODOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO ATUAIS .....	22
3.3.1	<i>Compensação da energia reativa recorrendo a baterias de condensadores.....</i>	<i>23</i>
<b>4</b>	<b>CONTABILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>27</b>
4.1	CONTAGEM DA ENERGIA ELÉTRICA.....	27
4.2	MODELO DE FATURAÇÃO.....	27
4.3	A FATURA DA ENERGIA ELÉTRICA .....	30
<b>5</b>	<b>REGIME DE EXPLORAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES .....</b>	<b>33</b>
5.1	FORMULAÇÃO .....	34
5.2	MODELO PREDITOR CORRETOR.....	36
5.3	ENERGIA REATIVA: REGULAÇÃO DE TENSÃO E PERDAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO...	37

<b>6</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>41</b>
6.1	DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS .....	42
6.2	CARGAS ELÉTRICAS RELEVANTES .....	44
6.3	ESTADO INICIAL DO <i>CAMPUS</i> .....	44
6.3.1	<i>Consumos</i> .....	45
6.3.2	<i>Anomalias</i> .....	47
6.4	PROCEDIMENTO.....	49
6.4.1	<i>Recolha e análise de dados</i> .....	49
6.4.2	<i>Estratégia e locais de intervenção</i> .....	57
6.4.3	<i>Implementação</i> .....	59
6.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	68
6.5.1	<i>Quadro AVAC 1</i> .....	68
6.5.2	<i>Quadro AVAC 3</i> .....	69
6.5.3	<i>Quadro Q.P.2</i> .....	70
6.5.4	<i>Quadro Q.P.-2</i> .....	70
6.5.5	<i>Análise geral do sistema</i> .....	72
6.6	ANÁLISE FINANCEIRA .....	76
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXO I – CIRCUITOS E CONSUMOS DAS LUMINÁRIAS PREPONDERANTES .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO II – INTERVENÇÃO NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DA LITOTECA .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO III – ESQUEMA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS APÓS AS INTERVENÇÕES .</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO IV – PARÂMETROS PARA ANÁLISE FINANCEIRA.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO V – TERMO DE RESPONSABILIDADE DO AUTOR DO PROJETO DE</b>	
	<b>ALTERAÇÕES DE ELETRICIDADE.....</b>	<b>93</b>

# Índice de Figuras

Figura 1 – Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal. ....	1
Figura 2 – Diagrama de Sankey simplificado de uma instalação elétrica. ....	2
Figura 3 – Posição das grandezas sinusoidais com a mesma frequência. ....	8
Figura 4 – Potências num circuito monofásico. ....	11
Figura 5 – Símbolo de uma bobina. ....	13
Figura 6 – Símbolo de um condensador. ....	13
Figura 7 – Série de harmónicas da corrente. ....	14
Figura 8 – Distorção harmónica na tensão. ....	15
Figura 9 – Triângulo de potências. ....	18
Figura 10 – Triângulo de potências: redução do fator de potência. ....	19
Figura 11 – Triângulo de potências com harmónicas. ....	20
Figura 12 – Representação no tempo da tensão, corrente e potência numa situação de compensação com $\cos \varphi = 1$ . ....	23
Figura 13 – Circuito de compensação do fator de potência. ....	24
Figura 14 – Armário de compensação de energia reativa. ....	24
Figura 15 – Esquema de compensação global (R – Relé Varimétrico). ....	25
Figura 16 – Níveis de tensão de alimentação. ....	27
Figura 17 – Esquema de imposto <i>Pigouviano</i> , adaptado à energia reativa. ....	29
Figura 18 – Esquema de um problema de afetação de unidades ligado à energia reativa. ....	35
Figura 19 – Esquema de compensação da energia reativa com base nos problemas de afetação de unidades aplicado a uma instalação. ....	35
Figura 20 – Esquema equivalente de uma linha curta. ....	38
Figura 21 – Diagrama vetorial das tensões nos extremos de uma linha curta. ....	39
Figura 22 – <i>Campus</i> LNEG Alfragide. ....	41
Figura 23 – Esquema das instalações elétricas. ....	43
Figura 24 – Evolução mensal dos consumos de energia ativa (2012 a agosto 2015). ....	45
Figura 25 – Diagrama de carga médio anual em dias úteis entre 2012 e agosto 2015. ....	46
Figura 26 – Diagrama de carga médio anual em dias não úteis entre 2012 e agosto 2015. ....	46
Figura 27 – Evolução dos valores mensais de energia reativa faturada em 2012 e 2013. ....	46
Figura 28 – Custos com a energia elétrica por parâmetros faturados em 2012. ....	47
Figura 29 – Custos com a energia elétrica por parâmetros faturados em 2013. ....	47
Figura 30 – Calibre dos disjuntores magneto térmicos (esquerda) e cabo com isolamento danificado (direita). ....	48
Figura 31 – Recolha de dados com recurso aos analisadores de rede. ....	49
Figura 32 – Potência ativa e reativa do quadro geral de distribuição no dia 28-07-2015. ....	50
Figura 33 – Valores de $\tan \varphi$ do quadro geral no dia 28-07-2015. ....	51

Figura 34 – Potência ativa e reativa do quadro AVAC 1 no dia 28-07-2015.....	51
Figura 35 – Potência ativa e reativa do quadro Edifício Social no dia 28-07-2015.....	52
Figura 36 – Potência ativa e reativa dos pisos do edifício principal e iluminação exterior no dia 28-7-2015. ....	53
Figura 37 – Desagregação dos consumos diários de energia ativa no dia 28-07-2015 [kWh]... 54	
Figura 38 – Desagregação dos consumos diários de energia reativa no dia 28-07-2015 (kVAr). .....	54
Figura 39 – Desagregação da potência reativa, em percentagem, do sistema AVAC.....	55
Figura 40 – Esquema dos locais da instalação elétrica intervencionados e tarefas realizadas. .....	57
Figura 41 – Armário (esquerda) e escalão (direita) de compensação.....	60
Figura 42 – Esquema do circuito para teste dos condensadores (esquerda). Teste aos condensadores (direita). ....	60
Figura 43 – Esquema de ligação da compensação do piso 4.....	62
Figura 44 – Bateria de condensadores do <i>chiller</i> . ....	62
Figura 45 – Sistema de compensação das eletrobombas BVC (esquerda) e BF (direita).....	63
Figura 46 – Sistema de compensação do transformador no piso 4. ....	63
Figura 47 – Esquema e imagem do sistema de compensação do piso 2. ....	65
Figura 48 – Instalação do cabo de alimentação do sistema de compensação do piso 2.....	65
Figura 49 – Colocação das luminárias reparadas (esquerda) e iluminação após intervenção (direita).....	66
Figura 50 – Compensação do fator de potência do sistema de iluminação da litoteca. ....	67
Figura 51 – Perfil médio diário de potência reativa entre os dias 5 e 11 de outubro de 2015 junto do Quadro Geral de Distribuição.....	74
Figura 52 – Perfil médio diário de potência reativa de carácter indutivo entre os dias 5 a 11 de outubro de 2015 registado pelos dados de telecontagem. ....	74
Figura 53 – Evolução dos valores mensais faturados de energia reativa antes e depois da implementação do sistema. ....	75
Figura 54 – Custos da energia elétrica por parâmetros faturados entre os meses de setembro e dezembro de 2015. ....	76
Figura 55 – Esquema das luminárias fluorescentes de 58 e 36 W.....	83
Figura 56 – Esquema do conjunto de duas luminárias fluorescentes de 36 W. ....	83
Figura 57 – Esquema elétrico das luminárias EcoTubo. ....	83
Figura 58 - Esquema das luminárias LED. ....	83
Figura 59 – Esquema de iluminação da Litoteca (piso -2).....	85
Figura 60 – Cabos com isolamento danificado, caixa de derivação A. ....	86
Figura 61 – Esquema das instalações elétricas após as intervenções. ....	89

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Origem da energia elétrica em Portugal, Diagrama de Sankey. ....	1
Tabela 2 – Classificação das Harmónicas para um sistema de 50 Hz.....	16
Tabela 3 – Limites de emissão de correntes harmónicas na etapa 1.....	17
Tabela 4 – Ciclo semanal opcional para os consumidores em MAT, AT e MT.....	28
Tabela 5 – Escalões de faturação e respetivos fatores multiplicativos. ....	30
Tabela 6 – Principais cargas elétricas e suas características. ....	44
Tabela 7 – Dados dos equipamentos do sistema AVAC.....	55
Tabela 8 – Dados dos pisos do edifício principal.....	56
Tabela 9 – Dados do sistema de iluminação da Litoteca (pisso -2).....	56
Tabela 10 – Potência do banco de condensadores das cargas alimentadas pelo quadro AVAC 1.....	61
Tabela 11 – Potência do banco de condensadores da UTA 6 alimentada pelo quadro AVAC 3. .....	64
Tabela 12 – Potência do banco de condensadores para compensação do quadro Edifício Social. .....	64
Tabela 13 – Potência do banco de condensadores de cada caixa de derivação do sistema de iluminação da Litoteca. ....	67
Tabela 14 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção nos equipamentos do sistema AVAC, piso 4. ....	68
Tabela 15 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no Quadro AVAC 1. ....	69
Tabela 16 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no quadro AVAC 3.....	69
Tabela 17 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no quadro Q.P.2.....	70
Tabela 18 – Valores instantâneos do sistema de iluminação da litoteca (pisso -2) antes e depois da compensação (ramal A a D). ....	70
Tabela 19 – Valores instantâneos do sistema de iluminação da litoteca (pisso -2) antes e depois da compensação (ramal E a G). ....	71
Tabela 20 – Valores instantâneos do quadro Q.P.-2 antes e depois da intervenção no sistema de iluminação. ....	72
Tabela 21 – Análise económica da solução implementada, tendo por base valores estimados. .....	77
Tabela 22 – Dados dos consumos das luminárias.....	83
Tabela 23 – Densidade de corrente J [A mm – 2] para condutores de cobre com isolamento PVC. ....	86
Tabela 24 – Custo real do sistema. ....	91
Tabela 25 – Tabela de preços para a estimativa de custo.....	91





## Abreviaturas

AT	Alta tensão
AVAC	Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado
BF	Eletrobomba de frio
BT	Baixa tensão
BTE	Baixa tensão especial
BTN	Baixa tensão normal
BVC	Eletrobomba dos ventiloconvetores
EDP	Energias de Portugal
FEE	Fundo de eficiência energética
MAT	Muito alta tensão
MT	Média tensão
PHP	Potência em horas de ponta
PT	Postos de transformação
QEE	Qualidade da energia elétrica
TRE	Técnico responsável pela exploração das instalações
UTA	Unidade de tratamento de ar
VEV	Variadores eletrónicos de velocidade

## Acrónimos

ADENE	Agência para a Energia
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
LABELEC	Estudos, Desenvolvimentos e Atividades Laboratoriais, S.A. (Grupo EDP)
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia

## Siglas

PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAC	Plano Nacional para as Alterações Climáticas
RLC	Circuito elétrico composto por uma resistência, uma bobina e um condensador
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço
RTIEBT	Regras técnicas para instalações elétricas de baixa tensão



## Nomenclatura

$A$	Secção do cabo [m <sup>2</sup> ]
$C$	Capacidade [F]
$d$	Distância [m]
$D$	Potência da distorção [VA]
$\vec{D}$	Corrente do deslocamento [A]
$DHT_I$	Parâmetro de distorção harmónica total da corrente [%]
$DHT_U$	Parâmetro de distorção harmónica total da tensão [%]
$\vec{E}$	Vetor Campo Elétrico
$E_{hp}$	Energia fornecida em horas de ponta [kWh]
$f$	Frequência [Hz]
$fp$	Fator de potência
$f_r$	Frequência de ressonância [Hz]
$h$	Ordem da harmónica
$I$	Valor eficaz da corrente [A]
$\bar{I}$	Amplitude complexa da corrente [A]
$I_C$	Valor eficaz da corrente com carácter capacitivo [A]
$i_C$	Corrente variável no tempo com carácter capacitivo [A]
$\bar{I}_e$	Amplitude complexa da corrente na emissão [A]
$I_h$	Valores eficazes dos termos da série Fourier da corrente [A]
$I_L$	Valor eficaz da corrente com carácter indutivo [A]
$I_{lampada}$	Valor eficaz da corrente no circuito da luminária [A]
$I_{lamp.def.}$	Valor eficaz da corrente no circuito da luminária com defeito [A]
$i_m$	Valor máximo da corrente variável no tempo [A]
$\bar{I}_r$	Amplitude complexa da corrente na receção [A]
$i(t)$	Corrente instantânea [A]
$I_0$	Valor médio da corrente [A]
$j$	Abstração matemática que denota a parte imaginária de um número complexo
$l$	Comprimento do condutor [m]
$L$	Coefficiente de autoindução [H]
$m$	Caudal de água [m <sup>3</sup> ]
$P$	Potência ativa [W]
$P_{contratada}$	Potência contratada [kW]

$P_{perdas}$	Potência de perdas por efeito Joule [W]
$P_r$	Potência ativa na receção [W]
$p(t)$	Potência instantânea [W]
$P_1$	Potência ativa na frequência fundamental [W]
$q$	Caudal de gás [m <sup>3</sup> ] ou [kg]
$Q$	Potência reativa [VAr]
$Q_{cap}$	Potência reativa da bateria de condensadores [VAr]
$Q_{cond}$	Potência reativa do condensador [VAr]
$Q_{disp}$	Potência reativa disponível [VAr]
$Q_{Esc.1}$	Potência reativa, valor de referência mínimo para o escalão 1 [kVAr]
$Q_{ind}$	Potência reativa de carácter indutivo [VAr]
$Q_{medido}$	Potência reativa no período de integração t [kVAr]
$Q_r$	Potência reativa na receção [VAr]
$Q_1$	Potência reativa na frequência fundamental [VAr]
$Q_{1,f}$	Potência reativa após compensação [VAr]
$R$	Resistência elétrica [ $\Omega$ ]
$R_L$	Resistência elétrica de linha [ $\Omega$ ]
$S$	Potência aparente [VA]
$S_r$	Potência aparente na receção [VA]
$S_{transformador}$	Potência aparente do transformador [VA]
$S_1$	Potência aparente da frequência fundamental [VA]
$S_{1,C}$	Potência aparente da frequência fundamental após compensação [VA]
$t$	Tempo [s]
$T$	Período [s]
$U$	Valor eficaz da tensão composta [V]
$\bar{U}$	Amplitude complexa da tensão composta [V]
$\bar{U}_e$	Amplitude complexa da tensão composta na emissão [V]
$U_h$	Valores eficazes dos termos da série Fourier da tensão [V]
$u_m$	Valor máximo da tensão variável no tempo [V]
$\bar{U}_r$	Amplitude complexa da tensão composta na receção [V]
$u(t)$	Tensão variável no tempo [V]
$U_0$	Valor médio da tensão [V]
$V$	Valor eficaz da tensão simples [V]
$W_{fat.1}$	Energia reativa a faturar para o escalão 1 [kVArh]

$W_p$	Consumo total de energia ativa [kWh]
$W_Q$	Consumo total de energia reativa [kVARh]
$X$	Reatância [ $\Omega$ ]
$\bar{X}$	Amplitude complexa ou fasor de uma função periódica
$X_C$	Reatância capacitiva [ $\Omega$ ]
$X_{ef}$	Valor eficaz de uma função periódica
$X_L$	Reatância indutiva [ $\Omega$ ]
$X_m$	Amplitude ou valor máximo
$x_{médio}$	Valor médio de uma função periódica
$x(t)$	Grandeza sinusoidal genérica
$\bar{Z}$	Impedância complexa [ $\Omega$ ]
$\bar{Z}_L$	Impedância complexa da linha [ $\Omega$ ]
$\alpha$	Fase na origem
$\theta$	Ângulo de defasamento entre duas funções periódicas [graus]
$\theta_L$	Ângulo de defasamento entre tensões na linha [graus]
$\lambda$	Coefficiente de contribuição ou nível de afetação
$\mu$	Permeabilidade magnética [ $H\ m^{-1}$ ]
$\sigma$	Condutividade elétrica [ $S\ m^{-1}$ ]
$\Phi$	Consumo total de água [ $m^3$ ]
$\varphi$	Ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente
$\varphi_I$	Fase na origem dos tempos da corrente
$\varphi_U$	Fase na origem dos tempos da tensão
$\varphi_1$	Ângulo de defasamento entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente
$\varphi_{1,c}$	Ângulo de defasamento entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente após compensação
$\Psi$	Consumo total de gás [ $m^3$ ] ou [kg]
$\omega$	Frequência angular [ $rad\ s^{-1}$ ]
$[M]$	Matriz “caudal”
$[H]$	Matriz “sazonal”
$[\Delta]$	Matriz “consumo”



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

O consumo de energia é necessário para o desenvolvimento económico e social a nível mundial, tendo-se registado um consumo cada vez mais acentuado, Figura 1. O aumento do consumo de energia elétrica deve-se essencialmente ao setor industrial e doméstico, responsáveis por 38 e 26 por cento, respetivamente, do consumo total de energia elétrica no ano de 2014 (Pordata, 2016).

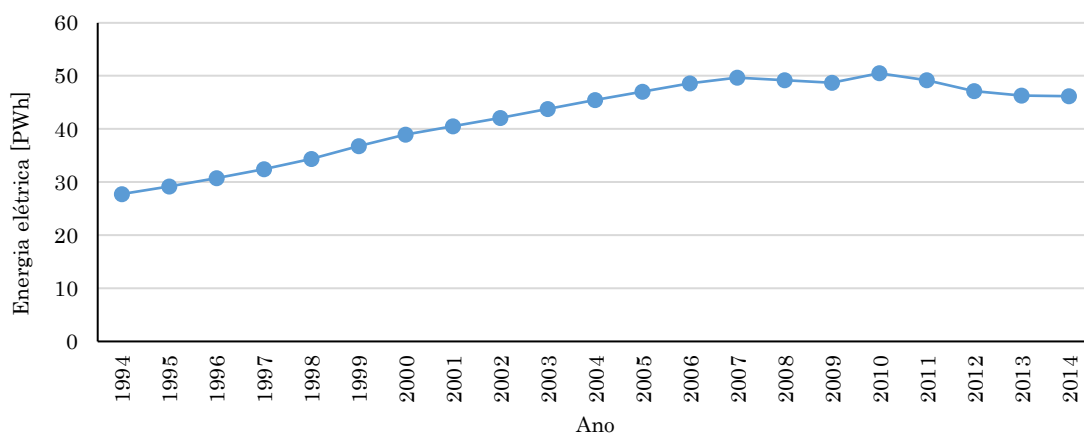


Figura 1 – Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal (Pordata, 2016).

A Tabela 1 mostra a origem da energia elétrica em Portugal e a percentagem a que corresponde cada recurso.

Tabela 1 – Origem da energia elétrica em Portugal, Diagrama de Sankey (Ag. regional de energia e ambiente, Médio Tejo 21, 2016).

Origem	Toneladas Eq. Petróleo	Percentagem
Carvão	846.952	20,0
Gás Natural	1.282.650	30,0
Fuel Óleo	104.926	2,1
Biomassa	212.159	5,0
Energia Eólica	778.786	18,0
Energia Solar	22.806	0,5
Energia Hídrica	1.028.560	24,0
Biogás	13.660	0,3
RSU	46.844	0,1
<b>Total</b>	<b>4.337.343</b>	

As fontes renováveis de energia assumiram nos últimos anos um papel importante na total conjuntura energética nacional, sobretudo com o aumento progressivo de parques eólicos e de pequenas centrais hídricas no território português, representando cerca de

48 por cento do total de energia elétrica produzida. No entanto, mais de metade da energia elétrica, 52 por cento, tem origem não renovável.

Por outro lado, o aumento do consumo de energia elétrica que se tem vindo a observar exige condições de funcionamento das redes de transporte e distribuição com um grau de fiabilidade muito elevado. É indispensável um controlo rigoroso e uma otimização da gestão da rede, sob pena de poder ocorrer fenómenos de congestionamento que, para além de fomentarem as perdas ocorridas na transmissão da energia elétrica, podem mesmo levar ao colapso do sistema. A elevada intensidade de corrente nos elementos do sistema, relacionada com o fluxo de potência ativa e reativa, resulta numa diminuição da capacidade do mesmo e perdas adicionais de energia ativa, o que exige naturalmente um aumento de produção de energia elétrica por forma a satisfazer os consumos.

A potência reativa é uma componente da potência instantânea, com valor médio nulo, que circula alternadamente entre a fonte e a carga e que compromete a eficiência das linhas de transmissão, nomeadamente provocando quedas de tensão e consequentemente perdas por efeito Joule, Figura 2.

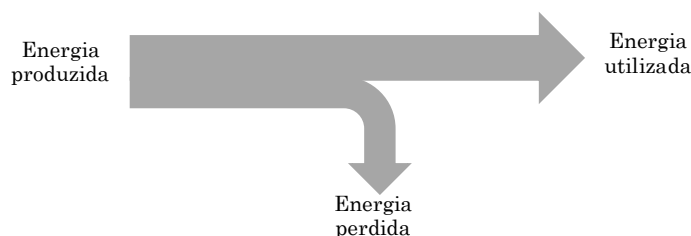


Figura 2 – Diagrama de Sankey simplificado de uma instalação elétrica.

Uma forma de resolver os problemas inerentes ao trânsito de energia reativa é proceder à sua compensação junto das fontes que o originam, nomeadamente nas instalações de consumo, evitando assim perdas na transmissão de energia elétrica e o congestionamento do sistema.

A energia reativa surge, então, como uma oportunidade de atuação no ramo da eletricidade para a promoção de eficiência energética, como definido nos objetivos nacionais propostos pelo Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE, 2013). Esta política energética nacional assenta na lógica da racionalidade económica e da sustentabilidade e tem como objetivos:



- reduzir significativamente as emissões de gases com efeito estufa, de forma sustentável;
- reduzir a dependência energética do país e garantir a segurança de abastecimento, através de um reforço diversificado das fontes de energia primária;
- contribuir para a redução da despesa pública e uso eficiente dos recursos;
- contribuir para o aumento da competitividade económica, através da redução dos consumos e custos associados ao funcionamento das empresas e à gestão da economia doméstica.

Recentemente foi lançado um concurso (com dotação orçamental de trezentos mil euros), através do programa do Fundo de Eficiência Energética (FEE, 2015), com o objetivo de apoiar o investimento em equipamentos para redução da energia reativa no Estado. Desta forma, contribui-se para garantir a segurança de abastecimento, continuidade do serviço e reduzir a utilização dos recursos endógenos, utilizados na produção de energia elétrica.

Para incentivar o consumidor final a instalar sistemas de compensação do fator de potência foi atribuído um imposto sobre o trânsito de energia reativa, que define limites para os quais o responsável sofre uma penalização na fatura da energia elétrica.

A energia reativa em instalações que apresentam baixa distorção harmónica, pode ser compensada junto das fontes que a originam, através da instalação de baterias de condensadores. Tipicamente, os sistemas implementados detêm um conjunto de equipamentos que analisam, autonomamente, as características da rede e definem, por escalões, a potência necessária para a compensação do trânsito de energia reativa num determinado momento. Estes métodos de compensação atualmente utilizados são considerados eficazes sob o ponto de vista económico, no entanto, com as condições impostas pela legislação atualmente em vigor e os dimensionamentos efetuados de uma forma grosseira, os sistemas apresentam um conjunto de problemas técnicos que comprometem a qualidade de energia elétrica e a via útil dos próprios equipamentos.

## 1.2 Motivação e objetivos

Cada vez mais é necessário fomentar práticas e ideologias que visam a redução dos consumos de energia através da racionalização ou até mesmo da eliminação dos

mesmos. Estas devem-se mostrar viáveis do ponto de vista do investimento e fiáveis no que se refere a condições técnicas e ambientais. A presente dissertação teve como motivação principal o desenvolvimento de um trabalho prático, onde se pretendia estudar o comportamento de um método compensação do fator de potência, diferente do que atualmente se implementa para resolução dos problemas com a energia reativa.

Deste modo, os objetivos específicos preconizados no estágio e, consequentemente, inerentes à presente dissertação foram:

- estudo comportamental e implementação de uma nova metodologia para compensação do fator de potência, que visa a redução do valor da fatura da energia elétrica do *Campus* LNEG – Alfragide (*Campus*);
- implementação de uma solução técnica e económica que minimize os efeitos manifestados pelas configurações convencionais de compensação do fator de potência, nomeadamente no que diz respeito à poluição harmónica.
- como se trata de um edifício público e, tendo em conta o contexto económico atual, o foco apontou na redução do valor da despesa, definindo estratégias que permitiam atingir os objetivos sem investimentos supérfluos e, tanto quanto possível, valorizando os ativos existentes no *Campus*;
- objetivamente, ter sempre presente o conceito de eficiência energética em todas as decisões tomadas, atendendo à consciencialização ambiental e à gestão mais eficiente dos recursos naturais.

Os trabalhos foram realizados na vigência da atividade do Engenheiro António Manuel Sequeira Abreu, na qualidade de Técnico Responsável pela Exploração das Instalações do LNEG, em conformidade com o termo de responsabilidade e seguro de responsabilidade civil profissional (Anexo V).

### 1.3 Estrutura do documento

No Capítulo 1 descreve-se o enquadramento prático do tema e os objetivos definidos para o presente trabalho.

No Capítulo 2 são revistos os conceitos teóricos relacionados com a potência em regime sinusoidal, a distorção harmónica e a compensação do fator de potência.

No Capítulo 3 evidenciam-se as consequências quer da energia reativa quer da distorção harmónica nas instalações elétricas. São também mencionados os métodos

atualmente utilizados para a compensação de ambas.

No Capítulo 4 descreve-se, de forma sucinta, como é realizada a contagem de energia elétrica, o modelo de faturação e a sua evolução.

O Capítulo 5 apresenta o regime de exploração de bateria de condensadores, justificado por uma breve abordagem ao tema das perdas nas linhas de transmissão, e descreve dois modelos utilizados com referência para os trabalhos realizados.

No Capítulo 6 é apresentado o caso de estudo, onde é feita uma breve descrição das instalações elétricas e do estado inicial do *Campus*, no que diz respeito a consumos e anomalias. Descrevem-se também as etapas dos trabalhos realizados, nomeadamente, recolha e análise de dados, medidas propostas e respetiva implementação e discussão dos resultados. Por fim, faz-se uma análise económica simplificada do método utilizado e a sua comparação com o estado da arte.

O Capítulo 7 enumera as conclusões obtidas da metodologia defendida para compensação do fator de potência.



## 2 Conceitos teóricos

Para uma melhor interpretação do tema, é importante perceber os conceitos fundamentais que estão associados à energia elétrica, compreender o comportamento de um sistema de corrente alternada e os cálculos a ele associados, no sentido de melhor solucionar os problemas inerentes à sua utilização.

### 2.1 Grandezas sinusoidais

Genericamente, uma grandeza sinusoidal pode ser descrita da seguinte forma:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

onde o valor instantâneo  $x(t)$  é representado por uma amplitude ou valor máximo  $X_m$  e uma função sinusoidal com frequência angular  $\omega$  e fase na origem  $\alpha$ . A frequência angular, expressa em  $\text{rad s}^{-1}$ , obtém-se segundo:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

onde  $f$  é a frequência em hertz (Hz), ou seja, o inverso do período  $T$  em segundos (s).

Num sistema elétrico linear excitado por uma grandeza sinusoidal, todas as grandezas vão ser sinusoidais e de igual frequência, pelo que se torna importante conhecer a posição relativa das grandezas sinusoidais, ou seja, a sua fase, Figura 3. Estas podem estar em fase ou desfasadas, podendo a primeira estar em avanço ou atraso relativamente à segunda. Quando o desfasamento é de  $180^\circ$  diz-se que estão em oposição de fase.

O valor médio de uma função periódica é igual a:

$$x_{\text{médio}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} x(t) dt, \forall \alpha, \quad (3)$$

onde  $T$  corresponde ao período. O valor eficaz de uma grandeza é obtido da seguinte forma:

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} x^2(t) dt}, \forall \alpha, \quad (4)$$

Na situação de uma grandeza sinusoidal, tal como em (1), tem-se:

$$X_{ef} = \frac{X_m}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

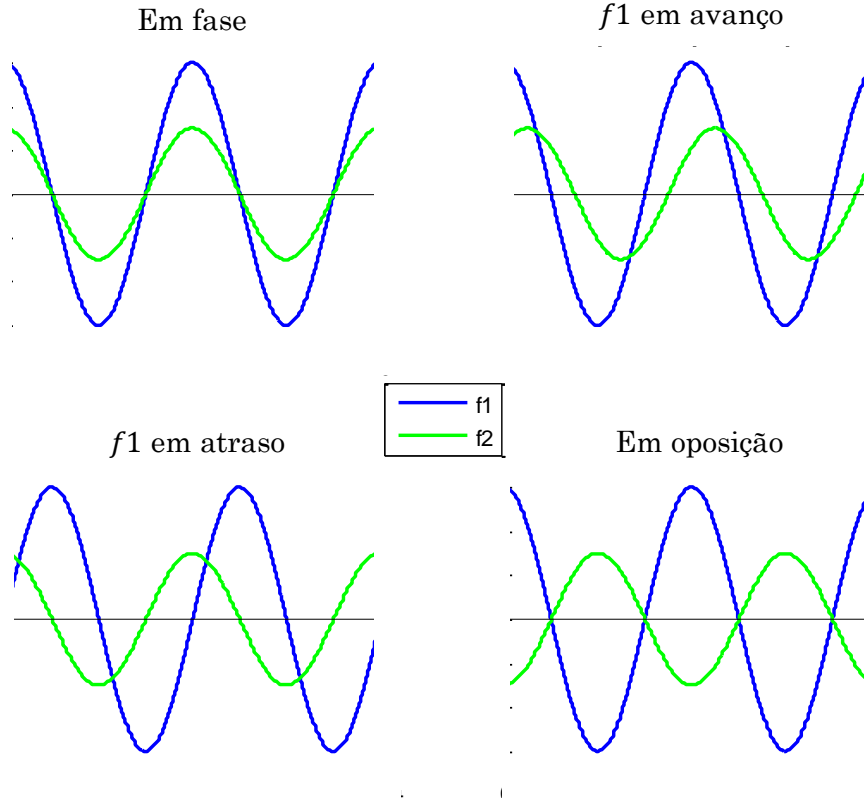


Figura 3 – Posição das grandezas sinusoidais com a mesma frequência.

Para melhor se compreender o conceito de valor eficaz, tome-se por exemplo, uma mesma resistência excitada por uma tensão sinusoidal (ou por qualquer outra forma de onda) e por uma tensão constante, o valor eficaz da tensão primeira é igual ao valor da tensão constante que faz com que as potências médias dissipadas na resistência sejam iguais.

Para simplificar o estudo com grandezas sinusoidais, utiliza-se muitas vezes a representação complexa. Segundo Euler a representação baseia-se em:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta. \quad (6)$$

Tendo em conta a expressão (6), é possível reescrever a equação (1) na seguinte forma:

$$x(t) = \text{Re}[\bar{X} e^{j\omega t}], \quad (7)$$

em que

$$\bar{X} = X_m e^{j\alpha}. \quad (8)$$

A amplitude complexa  $\bar{X}$  (ou fasor) contém informação sobre a amplitude e a fase da grandeza sinusoidal, sendo prática corrente utilizar o valor eficaz em substituição da amplitude  $X_m$ . No domínio complexo a derivação no tempo compreende a multiplicação do fasor da grandeza por  $j\omega$ , permitindo assim uma formulação mais simples da equação:

$$\frac{d}{dt} x(t) = \text{Re}[j\omega \bar{X} e^{j\omega t}] = j\omega \bar{X}. \quad (9)$$

## 2.2 Regime forçado alternado sinusoidal

Considera-se que um sistema é forçado alternado sinusoidal, constituído por elementos passivos e ativos lineares, se todas as tensões e correntes forem sinusoidais. Neste caso, como as grandezas variam no tempo de acordo com uma função sinusoidal, é importante o estudo do regime forçado alternado sinusoidal.

### 2.2.1 Impedância e reatância

A impedância traduz uma objeção dos circuitos à passagem de corrente, quando excitados por uma tensão e caracteriza-se por:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} = R + jX. \quad (10)$$

A unidade de medida da impedância é o ohm ( $\Omega$ ). A componente real é definida como resistência ( $R$ ). Quando  $\bar{Z} = R$  ( $X = 0$ ), diz-se que a impedância é resistiva pura. Quando  $R \neq 0$  e  $X > 0$  diz-se que  $\bar{Z}$  é de carácter indutivo, por sua vez, quando  $R \neq 0$  e  $X < 0$  diz-se que tem carácter capacitivo.

A impedância dos condensadores e bobinas é designada por reatância e caracteriza-se por ser imaginária pura. Esta última depende da frequência e, consoante o respetivo carácter, pode ser indutiva ( $X_L$ ) ou capacitiva ( $X_C$ ):

$$X_L = \omega L, \quad (11)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (12)$$

onde  $L$  e  $C$  são a indutância e a capacitância, respetivamente. Estas constantes encontram-se explicadas no subcapítulo 2.2.3.

### 2.2.2 Potência elétrica

A tensão e a corrente variam ao longo do tempo de acordo com:

$$u(t) = u_m \cos(\omega t + \varphi_U) \quad (13)$$

$$i(t) = i_m \cos(\omega t + \varphi_I), \quad (14)$$

em que  $u_m$  e  $i_m$  correspondem, respetivamente, aos valores máximos da tensão e da corrente,  $\omega$  é a frequência angular e  $\varphi_U$  e  $\varphi_I$  a fase na origem dos tempos da tensão e da corrente, respetivamente.

Sendo a potência instantânea o produto entre a corrente e a tensão instantâneas, tem-se:

$$p(t) = u_m i_m \cos(\omega t + \varphi_U) \cos(\omega t + \varphi_I). \quad (15)$$

Após a aplicação de algumas regras trigonométricas e admitindo que  $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$  obtém-se a seguinte expressão<sup>1</sup>:

$$p(t) = \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi) + \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + \frac{u_m i_m}{2} \sin(\varphi) \sin(2\omega t). \quad (16)$$

A equação apresenta uma parcela constante, sendo as restantes variáveis no tempo e de valor médio nulo. É importante salientar que a potência instantânea varia com o dobro da frequência. Em determinados momentos a tensão e a corrente têm sinais

---

<sup>1</sup>  $p(t) = u_m i_m \cos(\omega t + \varphi_U) \cos(\omega t + \varphi_I) \Leftrightarrow$   
 $\stackrel{A}{\Leftrightarrow} p(t) = u_m i_m \left[ \frac{1}{2} \cos(\varphi_U - \varphi_I) + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi_U + \varphi_I) \right] \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow p(t) = \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi) + \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + \frac{u_m i_m}{2} \sin(\varphi) \sin(2\omega t)$   
 $\stackrel{A}{A} \cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$



opostos, resultando num valor negativo de potência, ou seja, a carga entrega energia à rede.

Ao valor médio da potência instantânea<sup>2</sup>, que na equação (16) corresponde ao termo constante, dá-se o nome de potência ativa cuja unidade de medida é o *watt* (W):

$$P = \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi) \Leftrightarrow P = UI \cos(\varphi). \quad (17)$$

Os termos  $U$  e  $I$  referem-se aos valores eficazes da tensão e da corrente, respetivamente. O termo  $\cos(\varphi)$ , para sistemas puramente sinusoidais, é conhecido pelo fator de potência e será discutido mais à frente (Hofmann, Schlabbach, & Just, 2012).

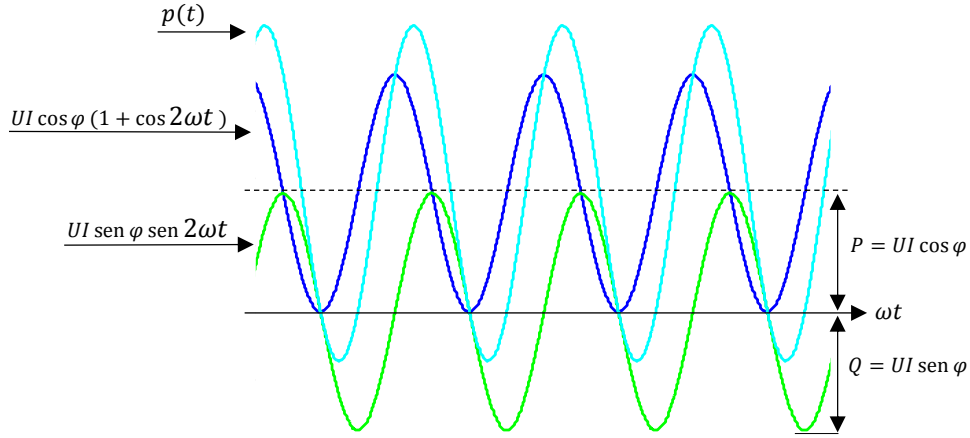


Figura 4 – Potências num circuito monofásico.

Da equação (17) pode-se considerar

$$S_1 = UI \quad (18)$$

como sendo a potência aparente. Esta corresponde ao valor máximo de potência ativa que se pode ter para uma dada tensão e corrente eficaz. Por exemplo, os cabos de transmissão de energia são dimensionados de acordo com a potência aparente da carga a alimentar. A unidade de medida é o *volt - ampére* (VA).

O valor máximo do último termo da equação (16) é designado por potência reativa, que

<sup>2</sup>  $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{u_m i_m}{2} \cos(\varphi_U - \varphi_I)$

tem como unidade de medida o *volt - ampére reativo* (VAr):

$$Q = UI \sin(\varphi). \quad (19)$$

Note-se que a potência reativa corresponde a uma parcela da potência instantânea que oscila entre a carga e a rede cujo valor médio é nulo. Nos circuitos passivos do tipo *RLC*, onde se verifica  $P \geq 0$ , o desfasamento entre a tensão e a corrente varia no intervalo:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

Para o caso em que  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , a carga considera-se puramente indutiva, característico de uma bobina. Quando  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ , a carga diz-se puramente capacitiva, típico de condensadores. Numa carga puramente resistiva, o desfasamento entre a tensão e a corrente é nulo, sendo a energia elétrica convertida em calor e quantificada de acordo com a Lei de Joule:

$$P_{perdas} = R I^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (21)$$

### 2.2.3 Origem da energia reativa

Tipicamente, as redes, para além de conterem elementos resistivos, possuem bobinas e condensadores, os quais são responsáveis pela energia reativa. Neste caso, contrariamente aos elementos puramente resistivos, os fenómenos são descritos por equações diferenciais de 1ª ordem.

#### 2.2.3.1 Bobina

Uma bobina é um elemento capaz de armazenar energia sob a forma de campo magnético. As bobinas são projetadas para introduzir quantidades específicas de indutância num circuito. A tensão é proporcional à derivada da corrente em ordem ao tempo:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (22)$$

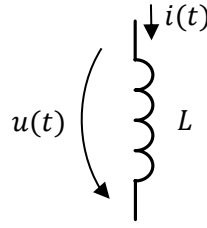


Figura 5 – Símbolo de uma bobina.

Reescrevendo a equação em amplitudes complexas da tensão e da corrente tem-se:

$$\bar{U} = j\omega L \bar{I}, \quad (23)$$

em que  $L$  corresponde ao coeficiente de autoindução com unidade de *henry* (H).

Os equipamentos constituídos por bobinas originam energia reativa com carácter indutivo, sendo uma consequência do campo magnético criado pelas mesmas. As máquinas assíncronas, os balastros ferromagnéticos e os transformadores são alguns exemplos desses equipamentos.

### 2.2.3.2 Condensador

Tal como a bobina, o condensador também é considerado um elemento reativo, sendo responsável pela energia reativa de carácter capacitivo. É constituído por um par de condutores separados entre si por um material dielétrico. No condensador, a corrente é proporcional à derivada da tensão em ordem ao tempo:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}. \quad (24)$$

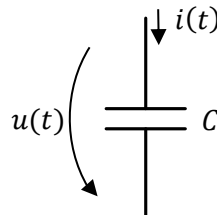


Figura 6 – Símbolo de um condensador.

Em amplitude complexa tem-se:

$$\bar{I} = j\omega C \bar{U}, \quad (25)$$

em que  $C$  é a capacidade do condensador, cuja unidade é o *farad* (F). O condensador tem a particularidade de armazenar cargas elétricas em cada uma das placas de que

é constituído. Essas cargas dão origem a um campo elétrico que, integrado ao longo do caminho entre as placas, origina uma tensão nos seus terminais.

## 2.3 Regimes não sinusoidais

Num sistema linear, quando excitado por uma grandeza sinusoidal, todas as variáveis do sistema são sinusoidais com a mesma frequência. Perante uma carga linear, ambas as grandezas são sinusoidais, podendo variar a amplitude e o desfasamento. Uma carga não linear, quando excitada por uma tensão sinusoidal, terá como tensão de saída e/ou corrente uma forma de onda não sinusoidal.

### 2.3.1 Teoria

Os sinais periódicos distorcidos podem ser descritos como uma soma de sinais com frequências múltiplas da fundamental (50 Hz em Portugal). Na Figura 7 verifica-se que o sinal distorcido (4), não é mais do que a soma dos sinais 3 e 2 com o sinal à frequência fundamental (1).

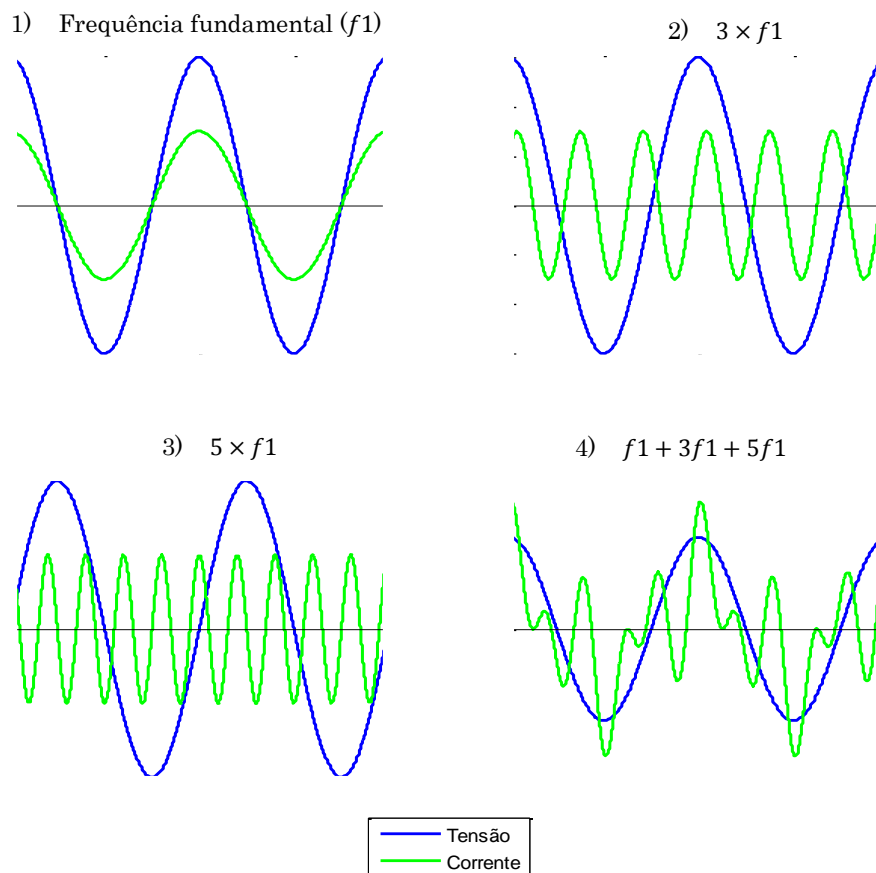


Figura 7 – Série de harmónicas da corrente.

É possível descrever um sinal periódico distorcido recorrendo à análise de Fourier,

genericamente representada por:

$$\begin{aligned} x(t) &= A_0 + A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (26)$$

Neste sentido, pode-se obter o valor eficaz da corrente segundo a expressão:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}, \quad (27)$$

em que  $I_0$  corresponde ao valor médio da corrente e  $I_h$  aos valores eficazes dos termos da série de Fourier da corrente.

Quando as correntes que percorrem uma linha não são sinusoidais, provocam quedas de tensão que, somadas à tensão da rede, fazem com que a tensão total não seja sinusoidal, Figura 8. Nesta situação, o valor eficaz da tensão é obtido da seguinte forma:

$$U_{ef} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{h=1}^N U_h^2}, \quad (28)$$

onde  $U_0$  corresponde ao valor médio da tensão e  $U_h$  aos valores eficazes dos termos da série de Fourier da tensão.

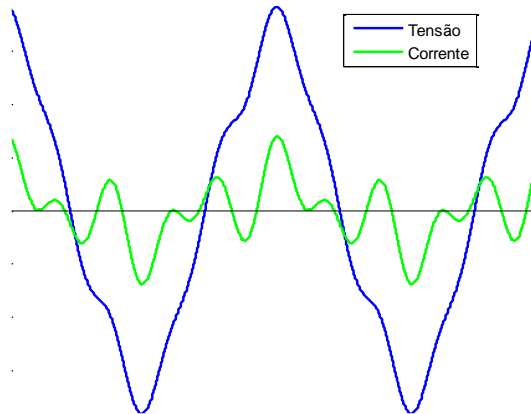


Figura 8 – Distorção harmônica na tensão.

### 2.3.2 Classificação das harmónicas

São considerados distorções harmónicas os termos da série de Fourier de um sinal periódico diferente da fundamental, criando um sinal cada vez mais afastado da forma sinusoidal pura. Nos sinais periódicos, as harmónicas têm frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental e são classificadas consoante a sua ordem e frequência.

Tabela 2 – Classificação das Harmónicas para um sistema de 50 Hz.

Ordem	1 (f)	2	3	4	5	6	7	8	...	n
Frequência	50	100	150	200	250	300	350	400	...	$n \times 50$

Para quantificar a poluição harmónica de uma rede utiliza-se o parâmetro de distorção harmónica total (*DHT*) para a tensão e corrente:

$$DHT_U[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U} \times 100 \quad (29)$$

$$DHT_I[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I} \times 100, \quad (30)$$

onde  $U_h$  e  $I_h$  se referem aos valores eficazes das harmónicas de tensão e de corrente de ordem  $h$ , respetivamente. De notar que os somatórios em numerador não incluem o valor correspondente à frequência fundamental.

### 2.3.3 Origem das harmónicas

Desde meados da década de 50 que se verifica uma grande evolução tecnológica, onde a utilização de equipamentos controlados por eletrónica de potência é cada vez mais frequente. Como exemplo tem-se: balastros eletrónicos, VEVs, computadores, carregadores de baterias, televisores, entre outros. No entanto, para além dos benefícios que os mesmos ostentavam relativamente às suas funcionalidades, originavam um conjunto de malefícios que comprometiam a qualidade de energia elétrica, nomeadamente a introdução de harmónicas na rede devido às suas características não lineares. Atualmente, existe regulamentação que impõe limites para emissões harmónicas aos equipamentos fabricados. Contudo, tendo em conta que a legislação é recente, ainda continuam a ser utilizados equipamentos antigos fabricados sem qualquer tipo de regulamentação. Os equipamentos comercializados

na Europa que são fabricados noutros locais do mundo, onde não existe qualquer tipo de regulamentação, têm também, por este motivo, um peso negativo.

### 2.3.4 Regulamento para as harmónicas

Dadas as perturbações que as harmónicas podem provocar no sistema elétrico, foi necessário elaborar um conjunto de normas para garantir a qualidade de energia elétrica. Para além de terem sido definidos parâmetros de qualidade de energia para o fornecedor, foram também definidos para os clientes, tendo estes de cumprir um determinado nível de imunidade quanto à emissão de harmónicas na rede.

O instrumento de normalização de qualidade de energia elétrica (QEE) em Portugal é o Regulamento da Qualidade de Serviço, RQS, que apresenta um conjunto de parâmetros de qualidade técnica, onde se destaca a qualidade da onda da tensão. Os limites de emissões são definidos tendo em conta a tensão do ponto de ligação da instalação à rede – muito alta tensão (MAT), alta tensão (AT) e média tensão (MT) (ERSE, 2013).

No âmbito do presente trabalho, interessa salientar as instalações ligadas à rede a pontos de interligação de MT. Neste caso, os limites são avaliados segundo duas etapas: na etapa 1 é realizada uma avaliação simplificada, onde os valores de emissão de correntes harmónicas não devem exceder os limites apresentados na Tabela 3; a etapa 2 refere-se a instalações com potências contratadas superiores a 2 MVA, equipadas com baterias de condensadores para correção do fator de potência ou filtros de harmónicas, onde os limites são definidos mediante o cálculo de vários indicadores que dependem das características da própria instalação (ERSE, 2013).

Tabela 3 – Limites de emissão de correntes harmónicas na etapa 1 (ERSE, 2013).

Ordem da harmónica	5	7	11	13
$I_h/I[\%]$	6	4	3	2.5

## 2.4 Compensação do fator de potência

### 2.4.1 Em regime sinusoidal

O fator de potência ( $fp$ ) é o quociente entre as potências ativa e a aparente que, num regime puramente sinusoidal, corresponde ao cosseno do ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente:

$$fp_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1. \quad (31)$$

O índice 1 considera, unicamente, os valores referentes à frequência fundamental. Os valores de fator de potência variam entre 0 e 1, sendo o valor desejado o mais próximo de 1, ou seja, a quantidade de energia reativa na instalação é nula. Existem duas formas de classificar o fator de potência, indutivo – a corrente está em atraso relativamente à tensão – e capacitivo – a corrente está em avanço relativamente à tensão.

A relação entre as potências ativa e reativa – num regime puramente sinusoidal – pode ser representada num triângulo, designado por “triângulo de potências”. Este deriva do diagrama vetorial e todos os cálculos para obtenção das potências estão associados a conceitos básicos de trigonometria.

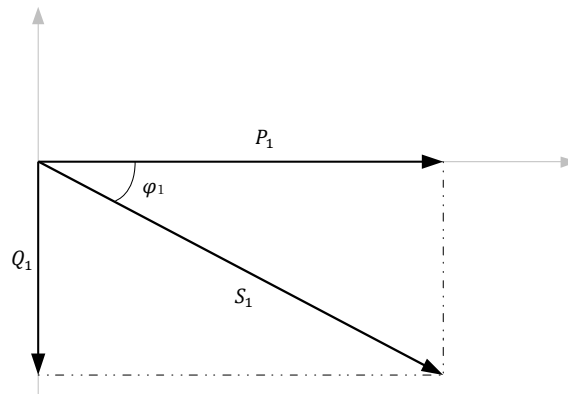


Figura 9 – Triângulo de potências.

Segundo o teorema de Pitágoras, a potência reativa obtém-se através da seguinte fórmula:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}. \quad (32)$$

Tipicamente, utiliza-se o seguinte índice de referência para contabilizarem a energia reativa:

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_1}{P_1}. \quad (33)$$

Outra forma de obter o fator de potência é através da seguinte expressão:



$$\cos \varphi_1 = \frac{P^2}{P^2 + Q^2} = \frac{1}{1 + \frac{Q^2}{P^2}} = \frac{1}{\tan^2 \varphi_1 + 1}. \quad (34)$$

Quando se fala em redução da energia reativa numa instalação, trata-se de diminuir o valor da  $\tan \varphi_1$  ou, conseqüentemente, aumentar o fator de potência para valores próximos do unitário.

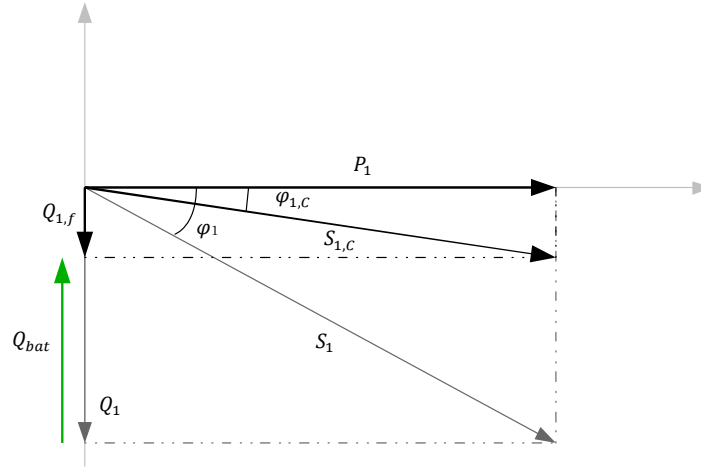


Figura 10 – Triângulo de potências: redução do fator de potência.

Como se pode verificar na Figura 10, diminuindo o valor da potência reativa  $Q_1$  para  $Q_{1,f}$ , o valor da potência aparente diminui para  $S_{1,c}$ , mantendo-se constante o valor da potência ativa  $P_1$ . Na realidade, corresponde ao alinhamento das ondas da corrente e da tensão.

Obtém-se o valor de potência reativa da bateria  $Q_{cap}$ , através da seguinte equação:

$$Q_{cap} = Q_1 - Q_{1,f} = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_{1,c}) \quad (35)$$

#### 2.4.2 Em regime não sinusoidal

Considere-se uma tensão sinusoidal e uma corrente sinusoidal, descrita por uma série de Fourier, o valor médio do produto entre as duas é nulo para todas as componentes, exceto a fundamental. Neste sentido, a potência ativa é dada por:

$$P = UI_1 \cos \varphi. \quad (36)$$

Por outro lado, num regime não sinusoidal, a potência aparente é descrita por:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (37)$$

onde  $D$  corresponde à potência da distorção:

$$D = U \sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2} \quad (38)$$

O fator de potência, na presença de harmônicas, obtém-se através do quociente entre (36) e (37):

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1. \quad (39)$$

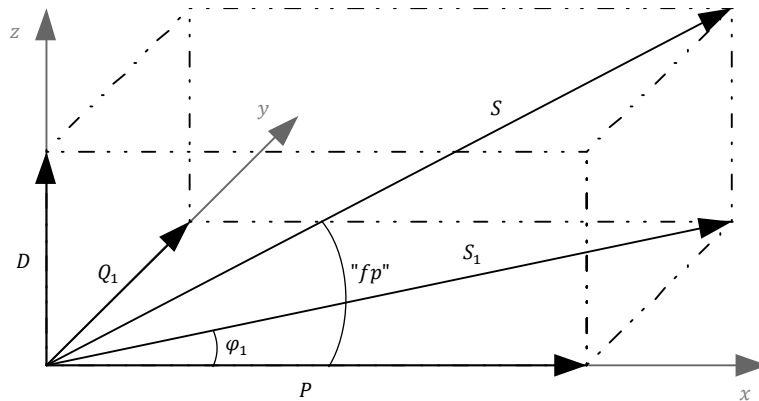


Figura 11 – Triângulo de potências com harmônicas.

Tendo as harmônicas frequências distintas, a soma das componentes reativas da potência instantânea deixaria de ter fundamento para a compensação da energia reativa. Neste sentido é comum representar-se as potências como mostra a Figura 11, onde a potência de distorção aparece no plano ortogonal ao triângulo de potências de um regime puramente sinusoidal.

### 3 Estado da arte

O aumento da procura de energia elétrica, aliado aos novos tipos de cargas de uma forma geral, alterou as características do sistema elétrico. Atualmente, o consumo de energia reativa é mais elevado e a presença de harmónicas é uma realidade. Inicialmente, quando se falava de qualidade da energia, a preocupação centrava-se na continuidade do sistema. Hoje em dia, para além dessa preocupação, existem outros parâmetros que se têm evidenciado, por exemplo, a segurança no fornecimento, a distorção harmónica, entre outros (EDP, 2005) (ERSE).

#### 3.1 Consequências de um baixo fator de potência

O trânsito de energia reativa no sistema elétrico de potência é inconveniente porque aumenta a intensidade de corrente nos elementos que o compõem – geradores, linhas de transmissão e transformadores – resultando na diminuição da capacidade útil dos mesmos, perdas adicionais de potência ativa e variações de tensão. Por este motivo, a potência reativa deve ser compensada o mais próximo possível da fonte que a origina. Para as redes de transporte, a questão central é a manutenção de um perfil adequado de tensão e a necessidade de precaver um eventual colapso, pelo que o operador do sistema procura minimizar o trânsito de energia reativa, impondo uma tarifa (discutida no Capítulo 4) que reflete os custos incorridos com disponibilização de potência reativa por parte do sistema elétrico de potência (Paiva, 2011).

Nas instalações de consumo, a existência de um elevado trânsito de energia reativa, traduz-se geralmente em piores condições de exploração. Entre outros efeitos destaca-se o aumento das perdas por efeito Joule nos cabos, sendo que as mesmas são proporcionais ao quadrado do valor eficaz da corrente total:

$$P_r = \frac{l}{\sigma A} I^2, \quad (40)$$

onde  $l$  se refere ao comprimento total do cabo,  $\sigma$  à condutividade elétrica dos condutores e  $A$  a secção dos condutores do cabo. Este fenómeno, faz com que se verifique também quedas de tensão que podem prejudicar as cargas mais sensíveis. O aquecimento excessivo nos componentes de proteção e comando das instalações é outro dos efeitos indesejados.

### 3.2 Consequências das harmônicas

A distorção harmônica tem efeitos quer a nível das redes de distribuição de energia – pondo em causa a qualidade técnica da energia e a continuidade do serviço – quer ao nível das instalações de consumo – provocando perturbações que podem pôr em causa a vida útil dos equipamentos e da própria instalação. Nos condutores, o aumento da frequência faz com que as correntes tendam a circular apenas na periferia do condutor, reduzindo assim a secção útil dos mesmos, a este fenómeno dá-se o nome de efeito pelicular. Nos transformadores de potência, as harmônicas contribuem para a diminuição do rendimento através de perdas no enrolamento e no núcleo de ferro. Nos motores assíncronos, a distorção provoca um sobreaquecimento dos enrolamentos do estator e um aumento da vibração no veio da máquina. O tempo de vida útil das lâmpadas incandescentes diminui e os equipamentos mais sensíveis podem sofrer danos significativos.

A poluição harmônica tem um impacto negativo significativo nos condensadores. Os problemas que podem ocorrer, entre outros, são as sobrecargas de corrente e fenómenos de ressonância. No primeiro caso, as perdas dielétricas e as perdas por efeitos de Joule, que derivam dos picos de correntes provenientes das harmônicas, contribuem para o aumento de temperatura dos condensadores, provocando perdas e possível destruição. O segundo caso, ocorre quando a frequência das harmônicas é igual à frequência de ressonância do circuito, afetando conseqüentemente a sua impedância, aumentando ou diminuindo, quando se trata de uma ressonância paralela ou série, respetivamente.

### 3.3 Metodologias de compensação atuais

Atualmente a compensação da energia reativa pode ser feita recorrendo a máquinas síncronas, a componentes reativos passivos, a filtros ativos de potência, condicionadores unificados de energia ou a filtros passivos.

O recurso a máquinas síncronas para compensação do fator de potência é tipicamente utilizado em instalações com elevados consumos de energia reativa, devido ao elevado custo de investimento. Esta técnica é utilizada, por exemplo, nos centros de produção hidroelétricos, fazendo decurso das máquinas síncronas existentes, em especial nas horas de menor consumo.

A utilização de filtros ativos de potência é uma solução inovadora e eficaz na resolução

de problemas relacionados com as harmônicas na rede e com o fator de potência. São equipamentos eletrônicos que, de uma forma dinâmica, analisam o espectro harmônico e injetam correntes na instalação para anular as harmônicas e, simultaneamente, compensar o fator de potência. No entanto, este método é recente e apresenta um elevado custo de investimento, pelo que se torna pouco apetecível por parte dos investidores.

É frequente a utilização de filtros passivos por ser uma solução barata e simples. Tipicamente, são constituídos por uma bobina instalada junto da fonte poluidora. Além disso, podem ser instalados, em paralelo com a indutância, condensadores elétricos, construindo assim um filtro rejeita-banda ou passa baixa que contribui, também, para o aumento do fator de potência da instalação. Apesar da sua simplicidade, este tipo de soluções pode introduzir quedas de tensão e situações de ressonância na instalação, limitando esta solução a equipamentos de baixa potência (Correia, 2007).

O método mais utilizado para compensar o fator de potência é a inserção de componentes reativos na instalação, mais concretamente, a utilização de baterias de condensadores para instalações com carácter indutivo. Este método revela-se simples e de baixo custo de investimento face às outras tecnologias.

### 3.3.1 Compensação da energia reativa recorrendo a baterias de condensadores

As correntes em atraso, em relação à tensão, das reatâncias indutivas  $I_L$  são compensadas pelas correntes  $I_C$  dos condensadores que se encontram em avanço relativamente à tensão, como ilustrado na Figura 12. Neste caso, a reatância da bobina é igual à do condensador, anulando-se mutuamente:

$$I = I_L - I_C \quad (41)$$

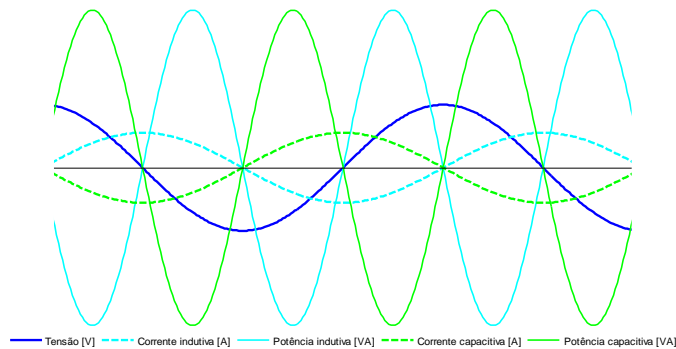


Figura 12 – Representação no tempo da tensão, corrente e potência numa situação de compensação com  $\cos \varphi = 1$ .

Normalmente a compensação é feita introduzindo, na instalação, condensadores em paralelo como mostra a Figura 13. Quando o sistema de compensação se localiza à entrada da instalação, normalmente a jusante do transformador, a metodologia tem o nome de compensação global. A compensação distribuída refere-se à localização das baterias de condensadores em vários pontos da instalação, tipicamente, o mais próximo da carga possível.

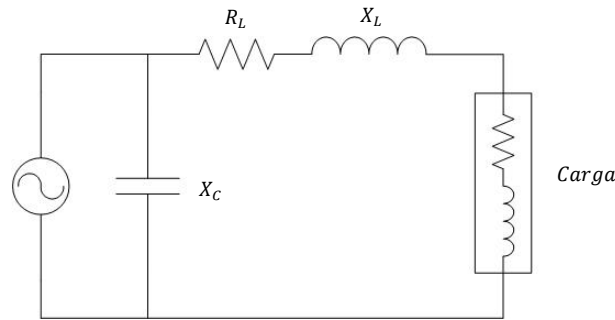


Figura 13 – Circuito de compensação do fator de potência.

Após a realização de uma pesquisa às empresas comercializadoras de sistemas de compensação da energia reativa, verificou-se que as soluções que apresentam são similares. Consistem em instalar um ou vários armários, dependendo das necessidades de potência, constituído por conjuntos de condensadores controlados por um dispositivo automático<sup>3</sup> que forma escalões<sup>4</sup> em função das necessidades da instalação.

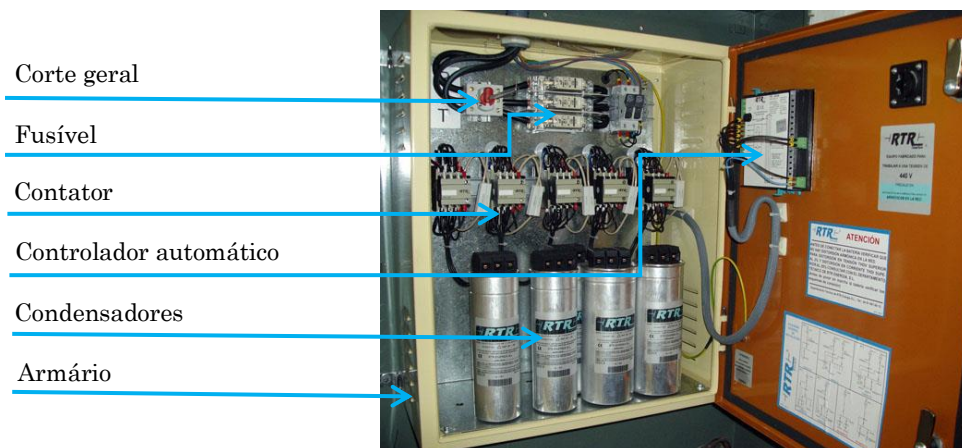


Figura 14 – Armário de compensação de energia reativa.

<sup>3</sup> Normalmente é utilizado o Relé Varimétrico. Este tem como função a recolha de dados e a gestão dos bancos de condensadores, através da ação dos contadores, por forma a obter o fator de potência de referência.

<sup>4</sup> São conjugações de condensadores por forma a obter a capacidade próxima da desejada.

O dimensionamento deste tipo de sistema é baseado nas faturas de energia elétrica e, em alguns casos, com medições efetuadas no local.

De acordo com fontes da ADENE, o método mais utilizado em Portugal é a compensação global (Figura 15), justificado pelo facto de ser o método mais eficaz e associado ao menor custo de investimento. No entanto defendem que, em determinadas situações apresentam desvantagens, nomeadamente em instalações industriais alimentadas em AT e cuja sua distribuição é realizada em média tensão até aos postos de transformação (PT) de média para baixa tensão. Nestes casos a compensação global iria trazer algumas desvantagens a nível de perdas no transporte. A solução seria a localização das baterias de condensadores em cada PT.

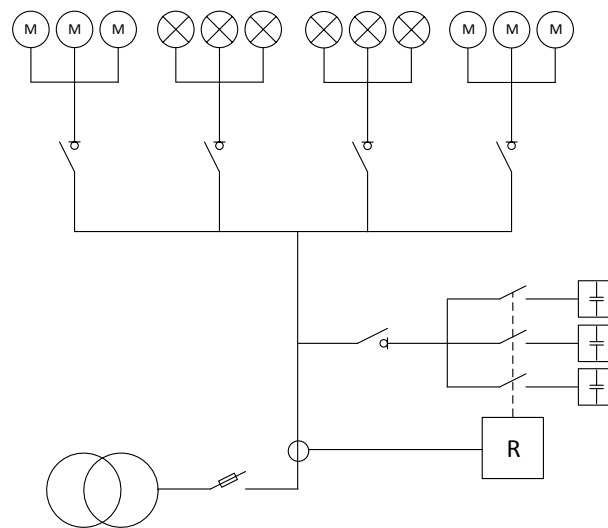


Figura 15 – Esquema de compensação global (R – Relé Varimétrico)

A mesma fonte diz que a compensação distribuída é efetuada em indústrias que contenham equipamentos de grandes potências e baixos fatores de potência comparativamente às restantes cargas da instalação, reduzindo as perdas a montante das mesmas e evitando possíveis distúrbios na rede, proporcionados pelo baixo fator de potência e fenómenos como as distorções harmónicas.





## 4 Contabilização da energia elétrica

### 4.1 Contagem da energia elétrica

A contagem de energia elétrica, para consumidores em baixa tensão, é realizada no ponto de ligação da instalação com a rede. Para consumidores alimentados em média tensão, a contagem pode ser realizada em média ou em baixa tensão, sendo que na primeira opção, as perdas ficam a cargo do cliente, uma vez que o ponto de medição se situa a montante do transformador. O fornecimento e instalação do equipamento de medição é da responsabilidade da EDP Distribuição (atual detentor da rede de distribuição portuguesa), a qual tem o dever de, em caso de avaria, proceder à sua substituição. Tipicamente, os sistemas de telecontagem de energia elétrica são constituídos por (exceto os clientes alimentados em baixa tensão normal): transformadores de medição, contadores, unidades remotas de telecontagem e respetivas ligações. Estes equipamentos permitem a contabilização da energia elétrica, mais concretamente, energia ativa e reativa transacionada num período de integração de 15 minutos, assim como têm a capacidade de enviar os dados, através de *GSM* (*Global System for Mobile Communications*), à central de recolha de dados da EDP Distribuição onde, posteriormente, são tratados.

### 4.2 Modelo de faturação

O modelo de faturação da energia elétrica é definido em função da tensão de alimentação (Figura 16), do período horário e da utilização de potência.

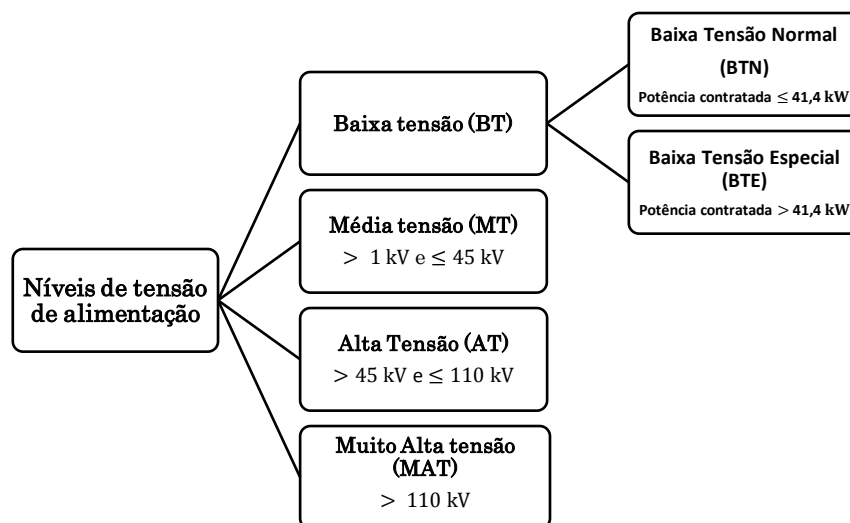


Figura 16 – Níveis de tensão de alimentação.

O período horário (Tabela 4) é delimitado pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), sendo que para cada período existe um valor de tarifa associado que, no caso da energia ativa, depende do comercializador.

Tabela 4 – Ciclo semanal opcional para os consumidores em MAT, AT e MT (ERSE, 2015).

<b>Segunda a sexta-feira</b>	<b>Hora de Inverno</b>	<b>Hora de Verão</b>
Ponta	17:00 / 22:00 h	14:00 / 17:00 h
Cheia	00:00 / 00:30 h	00:00 / 00:30 h
	07:30 / 17:00 h	07:30 / 14:00 h
	22:00 / 24:00 h	17:00 / 24:00 h
Vazio normal	00:30 / 02:00 h	00:30 / 02:00 h
	06:00 / 07:30 h	06:00 / 07:30 h
Super vazio	02:00 / 06:00 h	02:00 / 06:00 h
<b>Sábado</b>		
Cheias	10:30 / 12:30 h	10:00 / 13:30 h
	17:30 / 22:30 h	19:30 / 23:00 h
Vazio normal	00:00 / 03:00 h	00:00 / 03:30 h
	07:00 / 10:30 h	07:30 / 10:00 h
	12:30 / 17:30 h	13:30 / 19:30 h
	22:30 / 24:00 h	23:00 / 24:00 h
Super vazio	03:00 / 07:00 h	03:30 / 07:30 h
<b>Domingo</b>		
Vazio normal	00:00 / 04:00 h	00:00 / 04:00 h
	08:00 / 24:00 h	08:00 / 24:00 h
Super vazio	04:00 / 08:00 h	04:00 / 08:00 h

Segundo a EDP Universal, para a MT, a potência contratada é calculada com base na seguinte fórmula:

$$P_{contratada} = fp \times 0,5 \times S_{transformador}. \quad (42)$$

A potência contratada, em kW, tem de ser igual ou superior a 50% da potência instalada em kVA, medida pela soma das potências nominais dos transformadores. A fórmula inclui o fator de potência,  $fp$ , que, tipicamente se assume ter o valor de 0,93.

O valor da potência em horas de ponta, PHP, corresponde à média da potência ativa calculada no período de ponta durante um mês. Esta é obtida pelo quociente entre a energia fornecida em horas de ponta ( $E_{hp}$ ) e o período de integração em horas (15 minutos):

$$PHP = \frac{E_{hp}}{t_{15\ min.}[h]} = \frac{E_{hp}}{\frac{1}{4}} = 4 \times E_{hp}, \quad (43)$$

No caso do trânsito de energia reativa, considerando todas as consequências que o mesmo pode trazer, quer a nível da transmissão, quer na produção de energia elétrica, foi atribuído aos consumidores de energia elétrica um imposto designado por *Pigouviano*. Este imposto consiste em fazer pagar ao agente “poluidor”, uma taxa de igual montante aos danos causados por essa “poluição”. O objetivo será promover a redução do trânsito até uma quantidade ótima  $Q_{ótimo}$  (Figura 17) – obtida consoante os impactos dos danos causados – acima da qual existe uma penalização calculada de acordo com os níveis de trânsito de reativa.

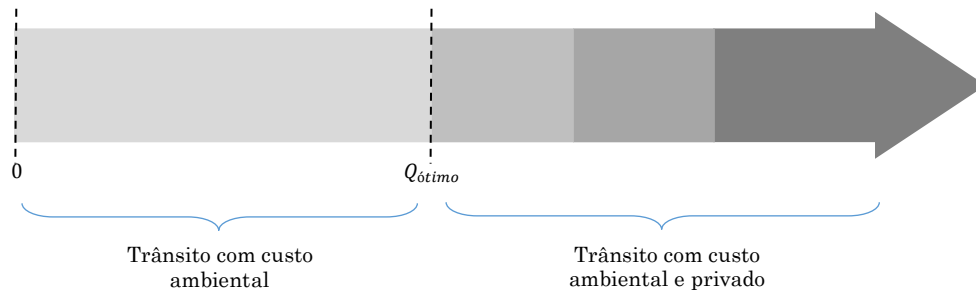


Figura 17 – Esquema de imposto *Pigouviano*, adaptado à energia reativa.

A tarifa da energia reativa, imposta pela ERSE, recai sobre as instalações alimentadas em MAT, AT, MT e BTE que disponham de telecontagem. O preço é definido em função da potência contratada, da tensão de alimentação e do período horário.

O antigo regime de faturação de energia reativa aprovado pela ERSE (Despacho n.º 18 413-A/2001, de 1 de Setembro), estabelecia como referência para faturação o valor de  $\tan \varphi$  igual ou superior a 0,4 para a energia reativa de carácter indutivo nas horas fora de vazio. No caso da energia reativa de carácter capacitivo nas horas de vazio, o regulamento falava numa possível penalização, no entanto, a EDP (única concessionária no momento) não procedia à sua faturação. O período de integração em vigor na altura era mensal, ou seja, só seria sujeito a faturação o valor de energia reativa que excedesse 40% do valor total de energia ativa consumida nesse mesmo mês. Este regime mostrava-se pouco eficiente, permitindo que, em determinados momentos, o valor de  $\tan \varphi$  fosse ultrapassado (caso em que existia penalização).

O Despacho n.º 7253/2010 de 26 de abril veio substituir o antigo regime. Este impõe

escalões de faturação para a energia reativa de carácter indutivo, nos períodos fora de vazio, para os quais está associado um fator multiplicativo ao preço base de tarifa estabelecido pela ERSE, Tabela 5.

Nas novas regras de faturação, a energia reativa capacitiva é faturada nos períodos de vazio, tendo como referência o valor de  $\tan \varphi$  igual ou superior a 0,4.

Tabela 5 – Escalões de faturação e respetivos fatores multiplicativos (ERSE, 2010).

Escalões	Descrição	Fator multiplicativo
1	Correspondente a $\tan \varphi \geq 0,3$ e $\tan \varphi < 0,4$	0,33
2	Correspondente a $\tan \varphi \geq 0,4$ e $\tan \varphi < 0,5$	1,00
3	Correspondente a $\tan \varphi \geq 0,5$	3,00

O período de integração é de 15 minutos, uma vez que se trata do valor mínimo de intervalo de tempo admitido pelos atuais contadores. Este regime obriga a um dimensionamento mais rigoroso e uma parametrização correta dos equipamentos de compensação sob pena de reduzir a sua vida útil, caso o dimensionamento seja feito de uma forma mais grosseira.

### 4.3 A fatura da energia elétrica

A fatura da energia elétrica é constituída por várias parcelas: comercialização, potência contratada, potência nas horas de ponta, energia ativa por período horário e energia reativa fornecida e recebida. É importante destacar que a quantidade de energia reativa consumida discriminada na fatura é o valor excedido pelos limites impostos para cada escalão. Por exemplo, para o escalão 1 a quantidade a faturar é calculada da seguinte forma:

$$W_{fat.1}[\text{kVArh}] = (Q_{medido} - Q_{Esc.1}) \times t = P(\tan \varphi_{medido} - 0,3) \times t \quad (44)$$

onde  $Q_{medido}$  é o valor da potência reativa medida pelo contador no período de integração  $t$  e  $Q_{Esc.1}$  o valor de referência mínimo do escalão 1, para o qual existe penalização. Ora qualquer dimensionamento de um sistema de compensação de energia reativa que tenha por base os valores de energia reativa faturados, corre o risco de não cumprir com as necessidades da instalação em termos de potência reativa. Para um bom dimensionamento, a análise das faturas, por si só, não é suficiente, será

necessário uma auditoria técnica complementar à instalação, no sentido de analisar o perfil de consumos, registar os picos de potência e as características dos equipamentos existentes.



## 5 Regime de exploração de baterias de condensadores

O presente trabalho defende um regime de exploração de baterias de condensadores diferentes daquele que habitualmente é utilizado.

O método de compensação global tem como principais vantagens um baixo custo de investimento e um resultado final apreciável, no que diz respeito à redução das despesas com a fatura da energia elétrica. No entanto, apresenta alguns problemas técnicos que podem por em causa a continuidade de serviço e a segurança da própria instalação. Destacam-se os efeitos de manobra causados pela automação dos sistemas – que define a atuação dos escalões de compensação – e a concentração de uma elevada potência de carácter reativo à entrada da instalação, a qual pode dar origem a fenómenos de ressonância e criar instabilidade no sistema devido ao elevado conteúdo harmónico.

A presente dissertação defende a implementação de sistemas de compensação distribuídos por vários pontos da instalação elétrica – com características técnicas favoráveis à instalação das baterias de condensadores – com a finalidade de compensar o trânsito de energia reativa proveniente, não só das cargas alimentadas por esses mesmos pontos, como também de outros, cuja disponibilidade para instalação de sistemas de compensação se mostre difícil tecnicamente.

A instalação de sistemas para compensação do fator de potência nos vários pontos da instalação elétrica, para além de permitir considerar a impedância dos cabos de alimentação quando se procede ao dimensionamento dos mesmos, tem como principal vantagem a diminuição do valor eficaz da corrente que percorre os cabos, que consequentemente está associada às perdas por efeito Joule e às quedas de tensão, como explicado no subcapítulo 5.3.

Considerando que o método se baseia na compensação distribuída, as necessidades de potência reativa a instalar são menores, pelo que existe uma menor probabilidade de ocorrência de fenómenos que possam por em causa a segurança da instalação. Também é espectável a diminuição do impacto do conteúdo harmónico causado pelos condensadores elétricos, uma vez que o mesmo é parcialmente atenuado ao longo dos cabos de alimentação.

Quando se trata de sistemas de compensação individuais, a atuação dos mesmos pode

ser definida pelo sistema de gestão do equipamento compensado, o que diminui consideravelmente os efeitos de manobra causados pelos sistemas convencionais.

Por outro lado, este método evita a instalação de baterias de condensadores no posto de transformação, que apresenta condições inapropriadas à implementação deste tipo de sistemas de compensação, devido à elevada carga térmica do local e à proximidade ao ponto de ligação no ramal de média tensão.

## 5.1 Formulação

De acordo com a equação (35), o valor de potência reativa após a compensação do fator de potência num determinado ponto da instalação, pode ser obtido segundo a expressão:

$$Q_{disp} = Q_{cap} - Q_{ind}, \quad (45)$$

onde  $Q_{cap}$  é o valor da potência reativa (de carácter capacitivo) da bateria de condensadores instalada no respetivo ponto e  $Q_{ind}$  a potência reativa de carácter indutivo, característica das cargas alimentadas pelo mesmo ponto. Em situações cujo objetivo será obter um fator de potência próximo do unitário, pretende-se que a potência reativa disponível  $Q_{disp}$  seja nula. Noutras, onde o objetivo consiste em compensar pontos a montante do ponto de ligação da bateria de condensadores, pretende-se que o valor de  $Q_{disp}$  seja positivo. Neste último caso, a compensação da energia reativa pode ser vista como um problema de planeamento de afetação de unidades tendo em consideração o carácter reativo de cada ponto da instalação. Nesta perspetiva, a equação (45) pode-se escrever da seguinte forma:

$$Q_{disp} = \lambda Q_{cap_{total}} - Q_{ind}, \quad (46)$$

em que  $Q_{cap_{total}}$  corresponde ao valor total de potência reativa capacitiva do banco de condensadores instalados e  $\lambda$  à contribuição (ou nível de afetação), ou seja, a percentagem de potência reativa total instalada  $Q_{cap_{total}}$  que terá influência no respetivo ponto. A diferença entre o valor da potência reativa da bateria de condensadores e a potência reativa indutiva das cargas determina o valor de potência reativa que irá refletir-se no ponto a montante. Um subconjunto de pontos da instalação contribui para afetação dos parâmetros do ponto a montante dos mesmos.



Assim, ignorando o carácter indutivo dos cabos de alimentação<sup>5</sup> (linhas de transmissão), pode-se considerar:

$$Q_{disp} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Q_{cap_{total}} - Q_{ind_i}. \quad (47)$$

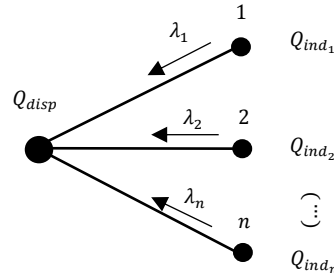


Figura 18 – Esquema de um problema de afetação de unidades ligado à energia reativa.

Desta forma, consegue-se obter uma potência reativa  $Q_{disp}$  com carácter nulo ou até capacitivo, que deriva das características dos equipamentos instalados nos pontos a jusante, nomeadamente do grupo de condensadores. A Figura 19 mostra um esquema de compensação de energia reativa com base nos problemas de afetação de unidades aplicado a uma instalação.

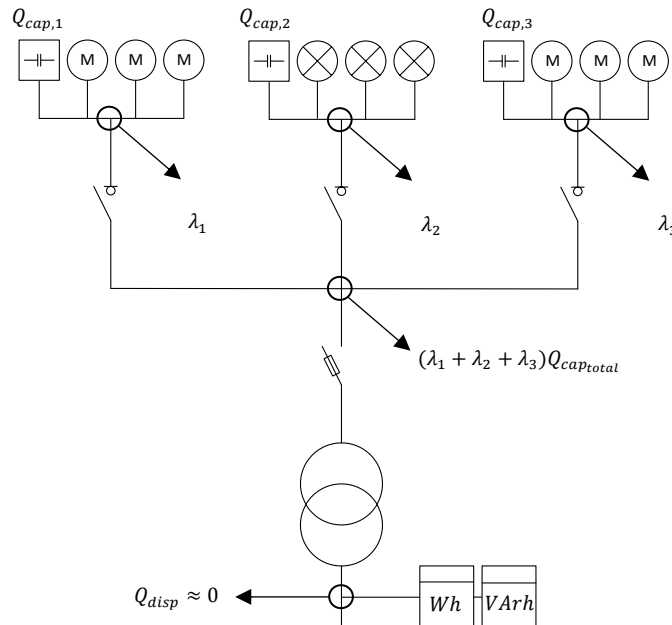


Figura 19 – Esquema de compensação da energia reativa com base nos problemas de afetação de unidades aplicado a uma instalação.

<sup>5</sup> Circunstância essa que é levada em consideração no estudo realizado pelo Engenheiro António Sequeira Abreu relacionado com o mesmo tema.

Numa perspetiva global da instalação, pretende-se que a potência reativa disponível no ponto de ligação com a rede, onde tipicamente se encontra o contador, seja aproximadamente nula. O principal objetivo é alcançar um nível de penalização eficiente dos vários pontos, que resolva grande parte dos problemas inerentes ao trânsito de energia reativa na instalação, quer do ponto de vista técnico quer do ponto de vista económico.

## 5.2 Modelo Preditor Corretor

A utilização do conceito descrito anteriormente requer uma análise aos vários locais da instalação, no que diz respeito a potências (ativa e reativa) e características técnicas, por forma a perceber se existem condições para implementação dos sistemas de compensação. A recolha dos dados tem em conta um modelo, desenvolvido pelo Engenheiro António Abreu, designado por “*Modelo Preditor Corretor*” que entre outras aplicações, reporta os valores das potências associadas a cada local da instalação e permite a sua análise de uma forma generalizada, tendo em consideração as características da rede (frequência, tensão e potência).

A forma mais económica e utilizada pela maior parte dos consumidores de energia elétrica de último recurso para monitorização dos consumos são os dados de telecontagem facultados pela concessionária. No entanto, os mesmos são disponibilizados algum tempo depois do período a que reportam, pelo que a existência de defeitos ou anomalias na instalação pode alterar o perfil de consumos, prejudicando o consumidor final através do aumento dos custos com a fatura da energia elétrica e, até mesmo, a existência de penalizações quando determinados limites de potência são excedidos. Neste sentido, o “*Modelo Preditor-Corretor*” permite a deteção rápida de problemas existentes na instalação, de forma a poderem ser resolvidos tão breve quanto possível, evitando uma discrepância de valores na fatura de eletricidade e garantindo a segurança da instalação.

Matematicamente, o modelo é representado pela seguinte matriz:

$$[\Delta] = [M][H] \Leftrightarrow \quad (48)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} W_p \\ W_Q \\ \Phi \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle P_1 \rangle & \langle P_2 \rangle & \dots & \langle P_n \rangle \\ \langle Q_1 \rangle & \langle Q_2 \rangle & \dots & \langle Q_n \rangle \\ \langle m_1 \rangle & \langle m_2 \rangle & \dots & \langle m_n \rangle \\ \langle q_1 \rangle & \langle q_2 \rangle & \dots & \langle q_n \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle P_1 \rangle h_1 & \langle P_2 \rangle h_2 & \dots & \langle P_n \rangle h_n \\ \langle Q_1 \rangle h_1 & \langle Q_2 \rangle h_2 & \dots & \langle Q_n \rangle h_n \\ \langle m_1 \rangle h_1 & \langle m_2 \rangle h_2 & \dots & \langle m_n \rangle h_n \\ \langle q_1 \rangle h_1 & \langle q_2 \rangle h_2 & \dots & \langle q_n \rangle h_n \end{bmatrix}$$

onde  $[\Delta]$  é a matriz “*consumo*” que inclui:  $W_p$  – consumo total de energia ativa em kWh,  $W_Q$  – consumo total de energia reativa em kVArh,  $\Phi$  – consumo total de água em m<sup>3</sup> e  $\Psi$  – consumo total de gás em m<sup>3</sup> ou kg.  $[M]$  corresponde à matriz “*caudal*”, na qual os elementos representam os consumos por unidade de tempo dos recursos medidos, potência ativa  $P$ , potência reativa  $Q$ , caudal de água  $m$  e caudal de gás  $q$ . E  $[H]$  define-se como matriz “*sazonal*”, cujos elementos correspondem aos períodos de utilização dos recursos.

A redução dos consumos baseia-se essencialmente na minimização dos valores da matriz *caudal*. Esta pode ser descrita mais pormenorizadamente, incluindo os termos referentes às perdas:

$$[M] = \begin{bmatrix} \langle P_1 \rangle + \langle p_{p_1} \rangle & \langle P_2 \rangle + \langle p_{p_2} \rangle & \dots & \langle P_n \rangle + \langle p_{p_n} \rangle \\ \langle Q_1 \rangle & \langle Q_2 \rangle & \dots & \langle Q_n \rangle \\ \langle m_1 \rangle + \langle m_{p_1} \rangle & \langle m_2 \rangle + \langle m_{p_2} \rangle & \dots & \langle m_n \rangle + \langle m_{p_n} \rangle \\ \langle q_1 \rangle + \langle q_{p_1} \rangle & \langle q_2 \rangle + \langle q_{p_2} \rangle & \dots & \langle q_n \rangle + \langle q_{p_n} \rangle \end{bmatrix} \quad (49)$$

Para o presente trabalho, interessa a matriz  $M$ , que reporta os valores de potência num determinado instante. Os termos da potência reativa são obtidos através da recolha de um conjunto de dados – tensão, corrente e desfasamento – nos vários pontos da instalação, os quais são quantificados através do módulo do valor da potência reativa transitada e do sinal, que define o carácter reativo (capacitivo ou indutivo). Consegue-se, desta forma, obter uma visão alargada dos vários pontos da instalação e atuar no sentido de otimizar o sistema de compensação para atingir os objetivos definidos.

### 5.3 Energia reativa: Regulação de tensão e perdas nas linhas de transmissão

Depreende-se que o regime de exploração de baterias de condensadores, discutido no início do presente capítulo, se adequa aos problemas inerentes ao trânsito de energia reativa ao longo dos cabos de alimentação de uma dada instalação. Contudo, a utilização do referido regime, tal como acontece com os sistemas atualmente utilizados, pode provocar fenómenos na rede que comprometem a sua estabilidade e segurança. Neste sentido, o “*Ábaco Preditor Corretor*” (*Ábaco*) é uma metodologia que permite avaliar um regime de exploração de baterias de condensadores. Entre outros fatores, o *Ábaco* considera o efeito da impedância dos cabos a montante, a capacidade de transporte dos cabos, as quedas de tensão longitudinais, os efeitos ressonantes e o rendimento dos cabos. A metodologia reflete, através de cálculos, a importância de se

considerar a impedância da rede a montante do ponto de instalação das baterias de condensadores, a poluição harmónica devida aos efeitos de manobra de corte e ligação das baterias, a regulação de tensão na recessão e o aumento das perdas ao longo dos cabos (Abreu, 2004).

Por forma a compreender, de uma forma simplificada, a metodologia citada, considere-se um modelo de linha curta ( $< 80$  km), apresentado no livro “Redes de Energia eléctrica” da autoria do Professor José Pedro Sucena Paiva, onde é feita a abordagem da queda de tensão que se verifica ao longo da linha de transmissão, quer nos domínios da MAT como da BT.

A linha é considerada como não ideal, onde é desprezada a admitância transversal, considerando unicamente o efeito da impedância transversal, Figura 20.

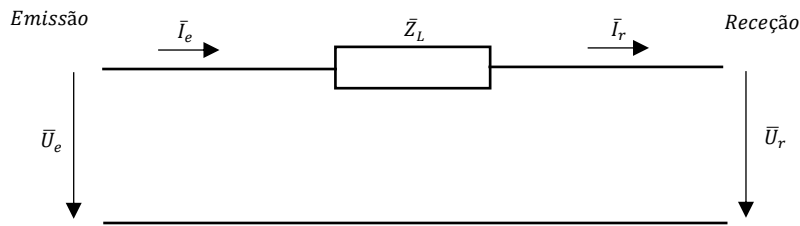


Figura 20 – Esquema equivalente de uma linha curta.

Admitindo que a linha entrega na receção uma potência complexa  $S_r = P_r + jQ_r$  e considerando fixa a tensão na receção  $\bar{U}_r$ , o objetivo é calcular a tensão na emissão  $\bar{U}_e$  e a queda de tensão na linha.

A potência complexa, por definição, descreve-se:

$$P_r + jQ_r = \bar{U}_r \bar{I}^*, \quad (50)$$

onde  $\bar{I} = \bar{I}_r = \bar{I}_e$  é a corrente que percorre a linha.

Considerando como referencia a tensão na receção  $\bar{U}_r$ , isto é,  $\bar{U}_r$  com argumento nulo, o valor da corrente obtém-se:

$$\bar{I} = \frac{P_r - jQ_r}{\bar{U}_r}. \quad (51)$$

A tensão na emissão é dada por:

$$\bar{U}_e = \bar{U}_r + \bar{Z}_L \bar{I} = \bar{U}_r + (R_L + jX_L) \bar{I} = \bar{U}_r + \frac{R_L P_r + X_L Q_r}{\bar{U}_r} + j \frac{X_L P_r - R_L Q_r}{\bar{U}_r}, \quad (52)$$

onde  $R_L$  e  $X_L$  são a resistência e reactância transversal de linha, respetivamente.

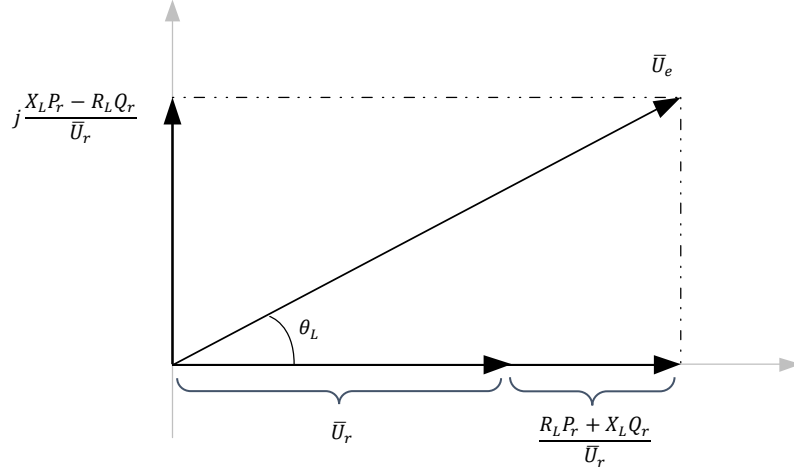


Figura 21 – Diagrama vetorial das tensões nos extremos de uma linha curta.

Para o caso da linha em questão, os valores de ângulo  $\theta_L$  são relativamente baixos, pelo que a queda de tensão, definida como a diferença entre os fasores das tensões  $\bar{U}_e$  e  $\bar{U}_r$ , pode ser aproximadamente:

$$\Delta \bar{U} = \bar{U}_e - \bar{U}_r \approx \frac{R_L P_r + X_L Q_r}{\bar{U}_r}. \quad (53)$$

Sendo  $\bar{U}_r$  uma tensão composta, a equação fornece a queda de tensão fase-fase. A queda de tensão fase-neutro pode-se obter utilizando a seguinte expressão:

$$\Delta \bar{U} \approx \frac{R_L P_r + X_L Q_r}{\sqrt{3} \bar{U}_r}. \quad (54)$$

Uma outra forma de escrever as equações acima referidas é a seguinte:

$$\Delta \bar{U} \approx R_L |I| \cos \varphi + X_L |I| \sin \varphi. \quad (55)$$

Onde  $\cos \varphi$  é o fator de potência da carga alimentada pela linha.

A equação (53) mostra que a queda de tensão aumenta com a potência reativa transitada na linha. Por este motivo, a potência reativa deve ser compensada junto da carga que a origina.



## 6 Caso de estudo

O caso de estudo, que deu origem à presente dissertação, refere-se às instalações do *Campus* LNEG – Alfragide. O *Campus* tem um edifício principal com uma área bruta de 14.574 m<sup>2</sup>, um edifício social que inclui o refeitório, bar, sala de exercício e gabinete médico e uma portaria junto ao acesso Norte. Na zona exterior existe um estacionamento e os respetivos acesos, Figura 22.



Figura 22 – *Campus* LNEG Alfragide.

O edifício principal possui 7 pisos, dos quais dois são subterrâneos (pisos -2 e -1), um térreo (piso 0) e três sob térreos (pisos 1, 2 e 3). Os pisos -1 e -2 são ocupados pelos serviços técnicos, nomeadamente uma litoteca, parque de sondas, armazém de amostras e alguns laboratórios. O piso -1, que corresponde somente à parte oeste do edificado, é reservado ao arquivo e arrumos. O piso 0, contém o *hall* de entrada do edifício, biblioteca, parte do auditório (a restante parte pertence ao piso 1) e o serviço de secretariado. Ainda neste piso, mas no exterior, está localizada uma unidade de tratamento de ar. Os pisos 1, 2 e 3 são ocupados por gabinetes e laboratórios.

No piso 4 situa-se a central térmica, onde se alberga uma caldeira, as eletrobombas responsáveis pela circulação da água do sistema AVAC pelo edifício e as respetivas tubagens. Neste piso localiza-se também a casa das máquinas dos elevadores. Nos terraços encontram-se dois *chillers* (unidade de produção de água fria).

Como mencionado na Figura 22, o *Campus* dispõe de posto de seccionamento

(propriedade da EDP), onde se encontra o equipamento de contagem de energia elétrica constituído por um contador, sistema de comunicação *GSM*, transformadores de medida e os dispositivos de corte e comando do ramal de média tensão. A entrega de energia ao posto de transformação é realizada em média tensão (10 kV). Este último possui dois transformadores de 630 kVA, um gerador de emergência a gasóleo de 120 kVA, dois armários com equipamento para compensação da energia reativa (parcialmente desativados, com sete escalões cada e uma capacidade total de 500 kVar) e toda a aparelhagem de distribuição de energia elétrica para o edifício.

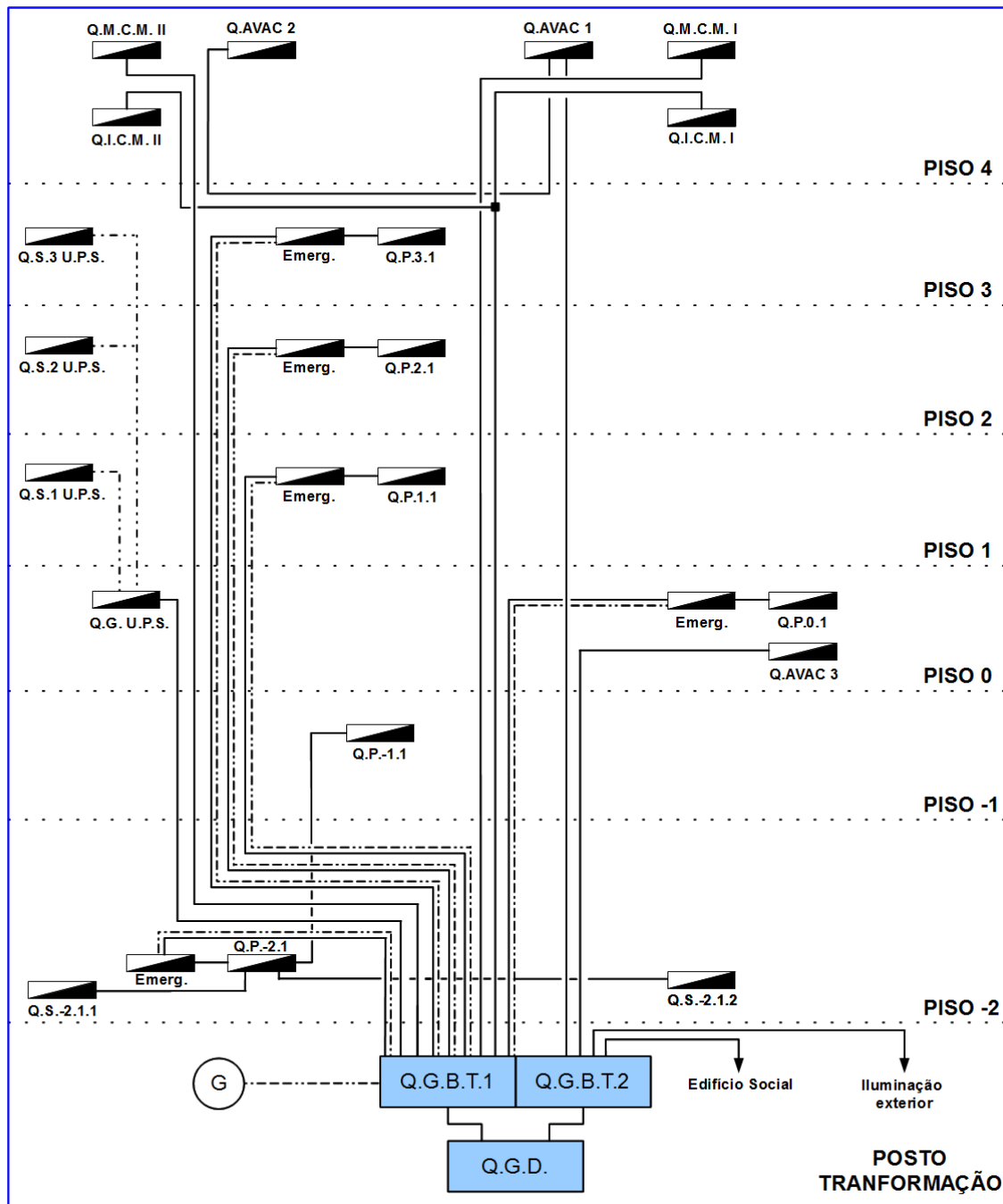
O Edifício Social alberga o refeitório (com perfil de funcionamento diário), bar, sala de exercício e gabinete médico.

### **6.1 Descrição das instalações elétricas**

A Figura 23 mostra a rede de distribuição de energia no edifício principal.

Como se verifica no esquema da instalação, os quadros parciais dos pisos são constituídos por um sistema de emergência (linha a tracejado), onde são alimentadas as cargas consideradas emergentes, como é o caso da iluminação dos espaços comuns, alguns sistemas informáticos e a iluminação de saída de emergência. Este sistema é dotado de um comando de gestão que faz acionar os contadores que separam a parte emergente das restantes cargas associadas aos quadros parciais. Assim, quando existe um corte de energia, o gerador liga automaticamente e o comando de gestão desliga grande parte da instalação, mantendo, unicamente, o sistema de emergência.





Legenda:

Q.G.D. – Quadro geral de distribuição  
 Q.G.B.T. – Quadro geral baixa tensão  
 Q.P. – Quadro parcial  
 Q.S. – Quadro de serviço

Q.M.C.M. – Quadro dos monta-cargas e elevadores  
 Q.I.C.M. – Quadro iluminação da casa das máquinas

Figura 23 – Esquema das instalações elétricas.

## 6.2 Cargas elétricas relevantes

Foram consideradas cargas com peso significativo nos consumos elétricos do *Campus* os elementos descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais cargas elétricas e suas características.

Quadro	Descrição	$P$ [kW]	$Q$ [kVAr]	$fp$
AVAC 1	<i>Chiller</i>	31,87	72,02	0,40
AVAC 1	Eletrobomba BVC 1	4,95	5,99	0,63
AVAC 1	Eletrobomba BVC 2	5,15	5,90	0,65
AVAC 1	Eletrobomba BF 1	7,35	6,99	0,70
AVAC 3	UTA 6	2,70	4,12	0,58

Na sua maioria, os gabinetes e os laboratórios tinham pelo menos uma unidade ventiloconvetora constituída por, entre outros elementos, um ou dois ventiladores. Os laboratórios dispunham de equipamentos específicos de apoio aos trabalhos realizados, cuja utilização era pouco frequente.

O sistema de iluminação dos gabinetes era constituído por várias armaduras, com duas lâmpadas fluorescentes de 36 W e dois balastros ferromagnéticos, que incorporavam um sistema de compensação local, baseado num circuito ressonante série. A iluminação dos locais de passagem (ou comuns) dos pisos 2 e 3 foi sujeita a alterações, propostas pelo sistema de gestão de energia do LNEG que visa a racionalização dos consumos de energia do *Campus*. Foram implementadas, no piso 3, luminárias do tipo T5, com o adaptador Eco-tubo para armaduras convencionais. No piso 2, foram substituídas as lâmpadas fluorescentes por Tubos LED com características adaptativas ao circuito das armaduras existentes. Nos pisos 1 e 0, o sistema de iluminação dos espaços comuns era constituído por uma luminária fluorescente de 36 W, um balastro ferromagnético e um condensador, responsável pela correção do fator de potência (o auditório, excecionalmente, tinha lâmpadas incandescentes). O piso -2 era iluminado, na sua maioria, por lâmpadas fluorescentes de 58 W com balastro ferromagnético que se encontra compensado localmente. Os consumos e os esquemas das luminárias anteriormente referidas encontram-se no Anexo I.

## 6.3 Estado inicial do *Campus*

Após uma visita técnica às instalações conseguiu-se recolher informação acerca do estado inicial do sistema elétrico do *Campus*.

Com as medidas implementadas, no âmbito dos estágios realizados no ano de 2014 – “Otimização dos sistemas AVAC, iluminação e águas no edifício do *Campus*” – foi possível a redução da potência que era necessária fornecer às instalações. À data da realização dos trabalhos, o *Campus* LNEG Alfragide utilizava unicamente um transformador e dispunha de uma potência contratada de 292,5 kW.

### 6.3.1 Consumos

Para análise do histórico dos consumos elétricos, recorreu-se aos dados de telecontagem disponibilizados pelo então comercializador de energia elétrica.

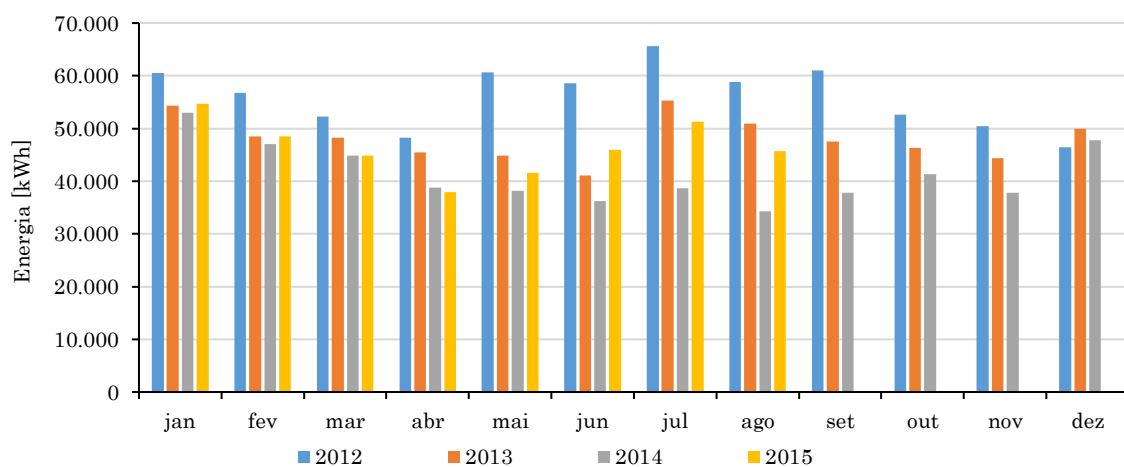


Figura 24 – Evolução mensal dos consumos de energia ativa (2012 a agosto 2015).

A considerável descida dos consumos no ano de 2014 deveu-se ao facto das unidades de produção de frio, por questões de avaria técnica, terem-se mantido inoperacionais na estação de arrefecimento. Tendo em conta esta situação, assumiu-se como referência, para efeitos de comparação, os anos de 2012 e 2013. Os meses referentes a 2015 foram considerados transitórios, uma vez que se tratou do período de implementação do método defendido na presente dissertação.

Na Figura 25 e Figura 26 observam-se os perfis de consumo diário da instalação em dias úteis e não úteis. No primeiro, durante o período noturno verificou-se um consumo médio de 40 kW, consideravelmente inferior ao diurno, podendo desta forma concluir-se que a atividade noturna era reduzida. Também aos fins de semana, existia pouca atividade, o pico compreendido entre as 5 e as 9 horas diz respeito ao período de laboração dos funcionários de limpeza.

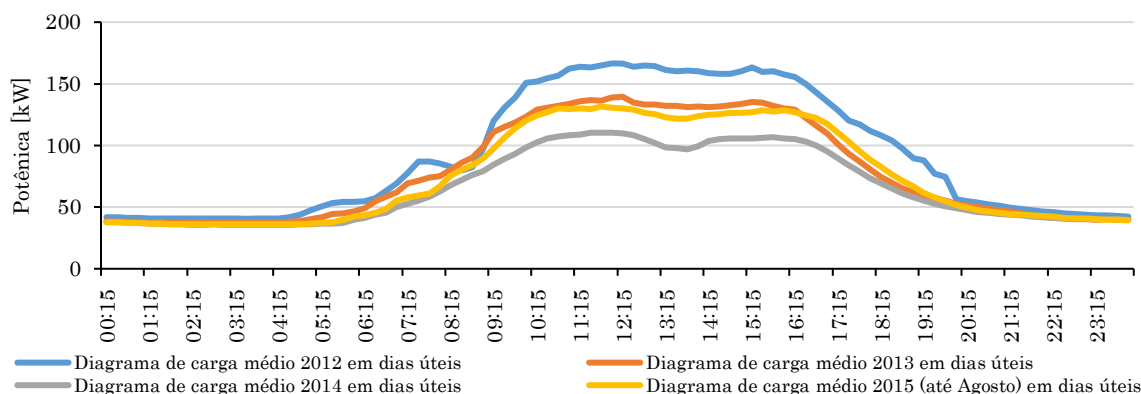


Figura 25 – Diagrama de carga médio anual em dias úteis entre 2012 e agosto 2015.

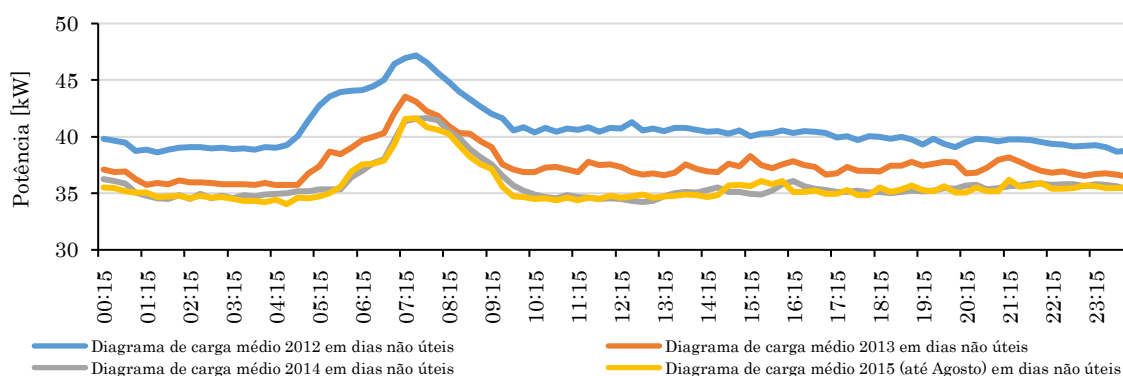


Figura 26 – Diagrama de carga médio anual em dias não úteis entre 2012 e agosto 2015.

O *Campus* possuiu um elevado trânsito de energia reativa nos anos de referência, Figura 27. Os valores médios da  $\tan \varphi$  atingidos nos anos de 2012 e 2013 foram de 0,8 capacitivo e 0,67 indutivo, respetivamente. O facto de ter havido uma mudança drástica de energia reativa de carácter capacitivo para indutivo, entre os anos de 2012 e 2013, deveu-se à desativação do sistema de compensação a 23 de janeiro de 2013. A justificação para esse ato é descrita no subcapítulo das anomalias.

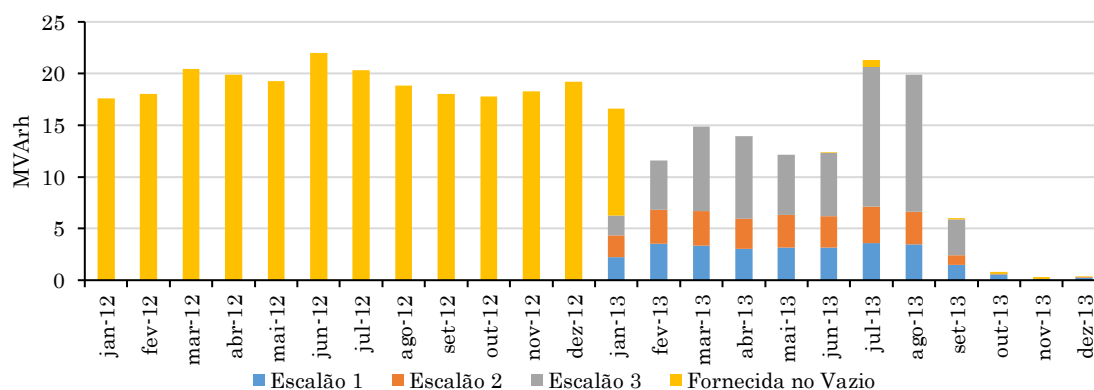


Figura 27 – Evolução dos valores mensais de energia reativa faturada em 2012 e 2013.

De seguida apresenta-se o peso de cada parâmetro da fatura da energia elétrica. É importante salientar o impacto que a componente reativa tem nos outros parâmetros, nomeadamente na potência contratada e na potência em horas de ponta.

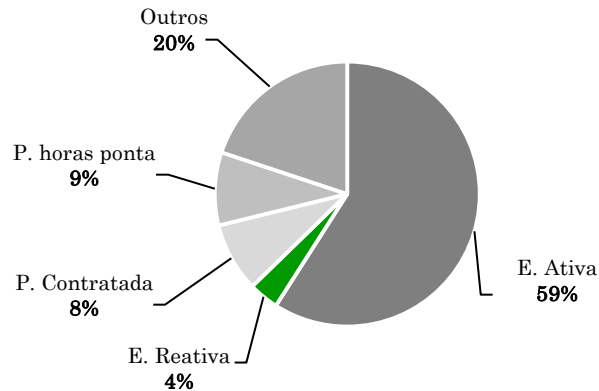


Figura 28 – Custos com a energia elétrica por parâmetros faturados em 2012 (valores absolutos na versão confidencial).

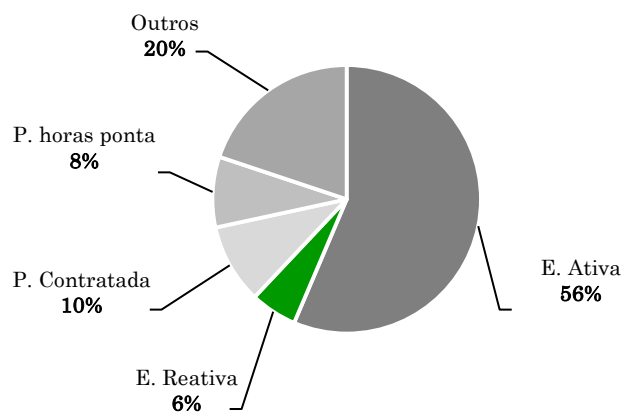


Figura 29 – Custos com a energia elétrica por parâmetros faturados em 2013 (valores absolutos na versão confidencial).

### 6.3.2 Anomalias

Em primeira instância, na análise ao PT, verificou-se uma mancha de fumo resultante da deflagração de incêndio numa bateria de condensadores outrora instalada. Posteriormente, nesse mesmo local, foi instalado um novo sistema de compensação do fator de potência constituído por dois armários que, apesar do seu aparente bom estado de conservação, continham condensadores danificados. De acordo com a informação do Técnico responsável pela exploração das instalações (TRE) – coorientador da presente dissertação – o sistema foi instalado ainda no antigo regime de faturação ( $\tan \varphi = 0,4$ ).

Como tal, para além do dimensionamento apropriado dos escalões, o relé varimétrico estava programado para atuar num intervalo de tempo mais alargado após uma variação do fator de potência da instalação. Na alteração para o atual regime, por forma a obter um fator de potência unitário num período de 15 minutos, o tempo de resposta do relé foi encurtado para os mesmos escalões de compensação (posteriormente sobredimensionados). Isto provocava um vício corrente na tipologia de amostragem que, para além de incitar um excessivo número de manobras que destruíam os condensadores, impunha uma elevada potência reativa de carácter capacitivo na instalação (Figura 27). Este comportamento originou uma poluição harmónica reportada pelos serviços de auditoria tipo II, conduzida pela LABELEC, no dia 23 de janeiro de 2013, o que levou à desativação do sistema.

No piso -2, mais concretamente na litoteca, o excessivo aquecimento dos cabos era notório pelo elevado estado de degradação do seu isolamento, o que causava disparos intempestivos das proteções, provocando a descontinuidade do sistema. Por forma a solucionar o problema, foram substituídos, em intervenções anteriores, os disjuntores magneto térmicos por outros de maior calibre, Figura 30, o que colocou em causa a segurança da instalação e do próprio edifício. As proteções não se encontravam dimensionadas de acordo com os limites de densidade de corrente admitidos pelos cabos, podendo levar a um sobreaquecimento dos mesmos e, consequentemente, causarem um incêndio.

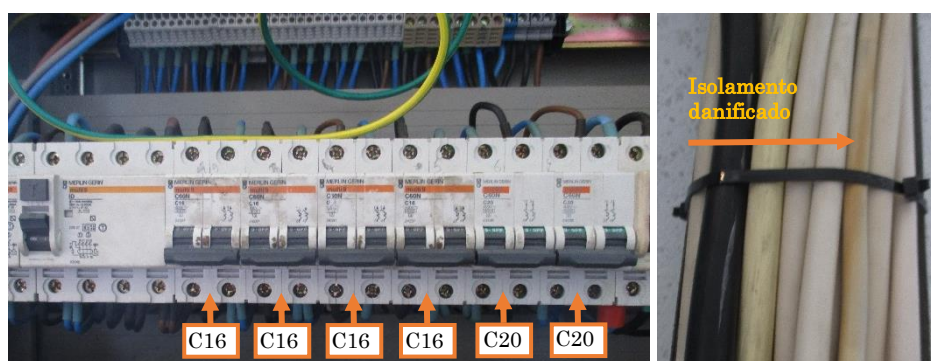


Figura 30 – Calibre dos disjuntores magneto térmicos (esquerda) e cabo com isolamento danificado (direita).

No mesmo piso, mas no parque das sondas, verificou-se um grande número de luminárias desligadas que comprometiam a iluminação da sala. O elevado estado de degradação dos balastros ferromagnéticos provocava disparos do interruptor diferencial instalado no quadro Q.S.-2.1.2. Verificou-se também que os condutores fase

e neutro encontravam-se trocados, fruto de intervenções anteriores que tentaram solucionar o problema de uma forma simplista e incorreta.

## 6.4 Procedimento

### 6.4.1 Recolha e análise de dados

Para uma análise mais técnica ao *Campus* procedeu-se à recolha de dados em pontos estratégicos da instalação, com recurso aos analisadores da marca *Chauvin Arnoux* e *Elcontrol (Energy Explorer)*, Figura 31. Estes equipamentos avaliam as principais grandezas – tensão, corrente, frequência, potências ativas e reativas, energia ativa e reativa e harmónicas da tensão e corrente – nas três fases, tendo como referência o neutro de serviço. Entre outros valores, estes equipamentos calculam o fator de potência, o desequilíbrio entre fases e a taxa de distorção harmónica, permitindo obter um conhecimento pormenorizado do comportamento da instalação.

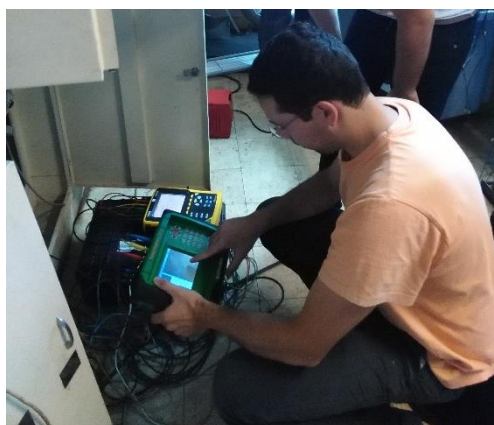


Figura 31 – Recolha de dados com recurso aos analisadores de rede.

Após uma análise às cargas consideradas importantes do ponto de vista do consumo e, tendo em conta os pontos de interligação das mesmas à instalação elétrica, definiram-se como locais estratégicos para recolha e análise dos perfis de consumo, o Quadro Geral (baixa tensão), AVAC 1 e Edifício Social. Através de cálculos, obtiveram-se os valores do consumo diário dos restantes elementos da instalação, predominantemente associados aos quadros parciais dos pisos do edifício principal e à iluminação exterior.

Os dados foram recolhidos na estação de arrefecimento, mais concretamente no dia 28 de julho de 2015, pelo que se encontrava em funcionamento o sistema térmico

adaptado à estação em causa (*Chiller*, eletrobombas, ventiloconvetores e algumas unidades *Split*<sup>6</sup>). Nesse mesmo dia, não houve registo de qualquer outra atividade significativa a considerar na avaliação dos dados em questão.

Na Figura 32, apresenta-se o perfil de consumo diário do Quadro Geral da instalação para o dia em estudo.

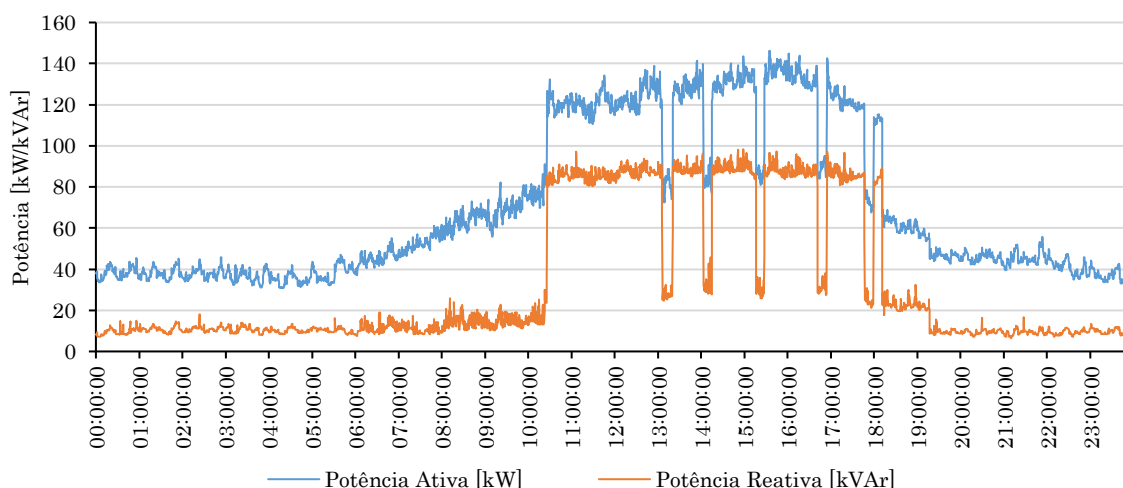


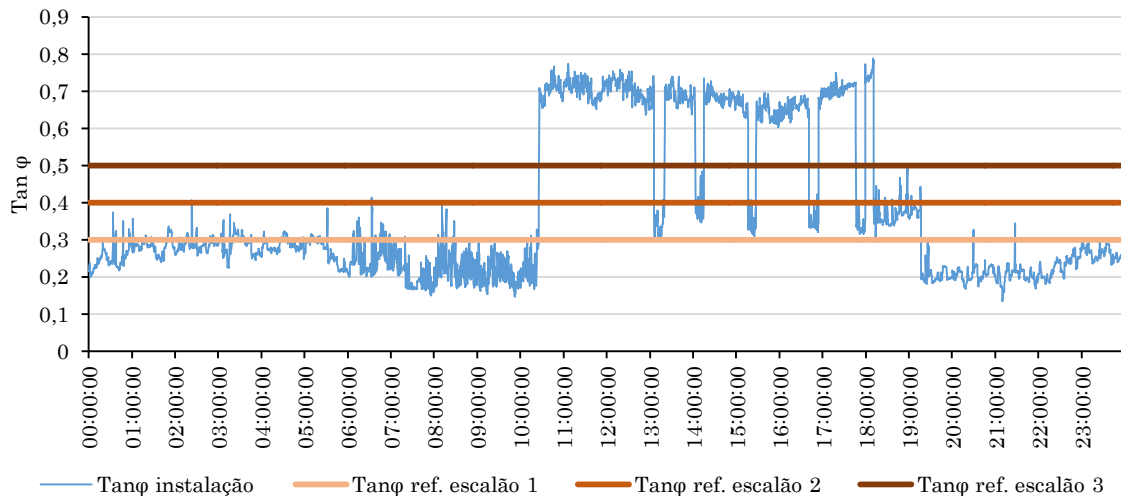
Figura 32 – Potência ativa e reativa do quadro geral de distribuição no dia 28-07-2015.

Os picos de consumo evidenciados no gráfico anterior dizem respeito ao comportamento do sistema térmico, mais concretamente do arranque e paragem do *chiller* - o funcionamento deste estava diretamente relacionado com as necessidades térmicas do edifício. Conclui-se, portanto, que o Sistema AVAC tinha um peso significativo no consumo do edifício.

Observa-se na Figura 33 o indicador  $\tan\phi$ , calculado com base na equação (33). É importante referir que o indicador foi obtido através dos dados recolhidos a jusante do transformador, pelo que os valores do indicador em causa são consideravelmente agravados junto do ponto de contagem da energia elétrica do *Campus*, do lado da média tensão. Como se pode observar, durante o dia os valores de  $\tan\phi$  foram relativamente elevados, dado que o LNEG ficava sujeito a uma penalização que abrangia os três escalões existentes.

<sup>6</sup> Unidade *Split* é um equipamento condicionador de ar, tipicamente dividido em dois módulos - unidade interna e unidade externa. Quando o objetivo é arrefecer um dado espaço, a unidade interna funciona como evaporadora e a externa como condensadora.




 Figura 33 – Valores de  $\tan \varphi$  do quadro geral no dia 28-07-2015.

No período noturno, os valores de potência reativa registados foram relativamente baixos, face à potência ativa registada em igual período, o que se traduz num valor de  $\tan \varphi$  abaixo do valor de referência para faturação ( $\tan \varphi = 0,4$ ) do lado da baixa tensão. No entanto, a probabilidade do mesmo ter sido atingido junto ao contador de consumo é elevada, devido ao trânsito de energia reativa provocado pelo transformador de potência.

O quadro AVAC 1 aglomerava um conjunto de cargas significativas, como é o caso do sistema térmico. À data de recolha dos dados, este operava no regime de arrefecimento, pelo que se encontrava em funcionamento o *chiller* e as respetivas eletrobombas, responsáveis pela circulação da água na instalação térmica. Neste sentido, este foi considerado um ponto da instalação de recolha de dados obrigatória.

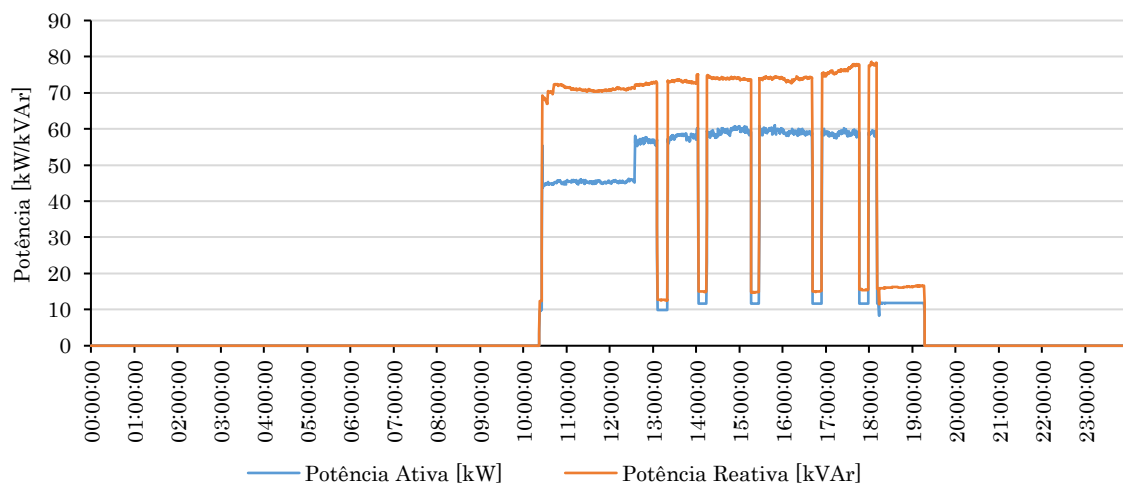


Figura 34 – Potência ativa e reativa do quadro AVAC 1 no dia 28-07-2015.

Na Figura 34, verifica-se uma forte componente reativa, fruto do carácter indutivo de, praticamente, todas as cargas associadas ao respetivo quadro. A subida do valor de potência ativa pelas 12 horas e 30 minutos deveu-se às características de arranque do compressor do *chiller*. Na data em análise, o quadro AVAC 1 atingiu uma potência máxima de 98 VA (61 kW; 79 kVAr).

O edifício social apresentou um consumo de energia ativa com elevado grau de instabilidade durante o período diurno. Em contrapartida, o mesmo não se verificou relativamente aos valores de potência reativa, Figura 35.

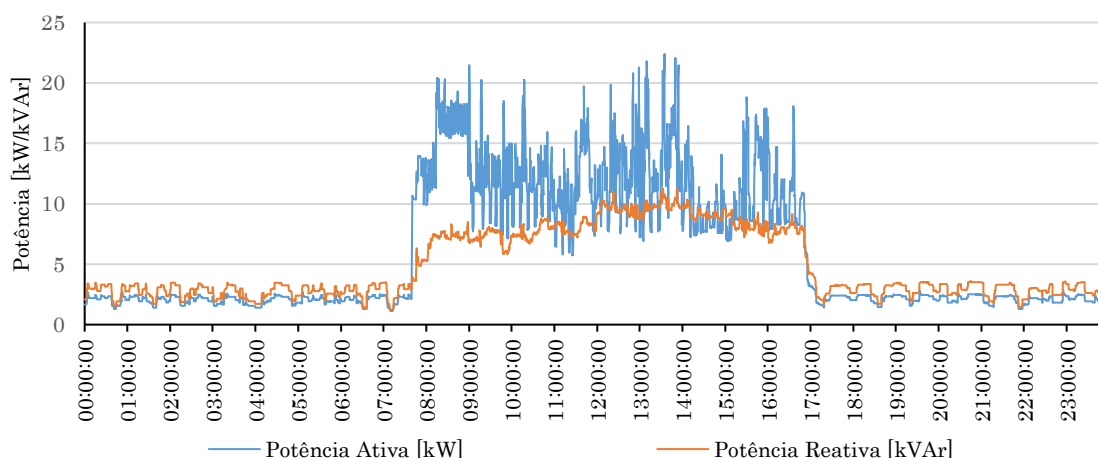


Figura 35 – Potência ativa e reativa do quadro Edifício Social no dia 28-07-2015.

O refeitório era composto por um conjunto de equipamentos com características puramente resistivas, tais como os fornos elétricos e as bancadas com água aquecida. O funcionamento deste tipo de equipamentos, controlados por termostatos, justificava o perfil de consumo diurno de potência ativa registado na figura anterior. A potência reativa durante o período noturno derivava essencialmente dos equipamentos de conservação dos alimentos, tais como arcas congeladoras, frigoríficos, entre outros. Durante o dia, os valores de potência reativa aumentavam devido às características das luminárias existentes e aos ventiladores de exaustão dos fumos provenientes da confeção da comida.

A recolha dos dados estava limitada ao número de equipamentos de medição disponíveis (3 analisadores com capacidade de gravação de dados). Como tal, foram recolhidos os dados (com recurso aos analisadores) dos quadros anteriormente referidos, tendo o perfil de consumo das restantes cargas do *Campus* (pisos do edifício principal e iluminação exterior) sido obtido da seguinte forma:

$$P_{restante} = P_{Q.Geral} - P_{AVAC\ 1} - P_{Ed.\ Social}, \quad (56)$$

$$Q_{restante} = Q_{Q.Geral} - Q_{AVAC\ 1} - Q_{Ed.\ Social}, \quad (57)$$

onde  $P_{restante}$  e  $Q_{restante}$  correspondem à potência ativa e reativa, respetivamente, das restantes cargas associadas ao Quadro Geral, como é o caso da iluminação exterior e dos quadros parciais dos pisos do edifício principal. Contudo, verificou-se algumas *nuances* relativamente aos dados obtidos. Foi utilizado um período de integração de 20 segundos para os 3 analisadores, mas estes não se encontravam em sincronismo relativamente ao momento exato da gravação dos dados, pelo que existiram ligeiras diferenças relativas à energia consumida obtida através das equações acima referidas, que se traduziram em picos mais acentuados (Figura 36). Ainda assim, foi possível obter um perfil de consumo próximo do real para as restantes cargas alimentadas pelo quadro geral da instalação.

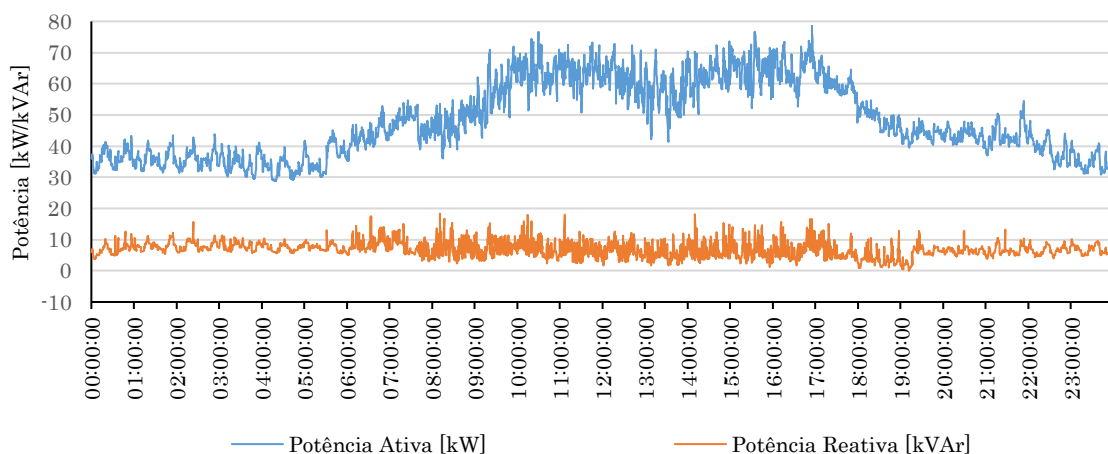


Figura 36 – Potência ativa e reativa dos pisos do edifício principal e iluminação exterior no dia 28-7-2015.

Da análise efetuada à Figura 36, verificou-se um perfil similar ao registado no diagrama de carga obtido através dos dados de telecontagem, fruto do período laboral do LNEG. Grande parte do trânsito de energia reativa do *Campus* no período noturno deveu-se ao conjunto de cargas com carácter indutivo permanentemente ligadas nesse mesmo período. Durante o período diurno, os valores de potência reativa registados apresentaram um intervalo de variação semelhante ao período noturno, cujo valor médio estava próximo dos 7 kVar – o trânsito de reativa deveu-se essencialmente ao carácter indutivo das luminárias que, no período laboral é compensado pelo carácter capacitivo de um conjunto de cargas ativas nesse mesmo período, o que justifica o

aumento de consumo de energia ativa e o valor constante de energia reativa. No Anexo III, encontram-se os valores de  $\tan \varphi$  das cargas em análise.

Nas Figura 37 e Figura 38 observa-se a desagregação dos consumos de energia ativa e reativa nos locais de recolha de dados. Na primeira figura, destaca-se o peso relevante dos consumos do edifício principal, predominantemente associados à iluminação e equipamento de escritório. Segue-se o sistema AVAC, com peso significativo na estação em causa, e por último o edifício social. Relativamente à segunda figura, é possível verificar que a origem do trânsito de energia reativa foi, grande parte, devida ao sistema térmico. O trânsito de energia reativa associado ao quadro AVAC 1, nas 24 horas em causa, situou-se próximo dos 523 kVarh (389 kWh; 653 kVA). As restantes cargas apresentaram valores próximos.

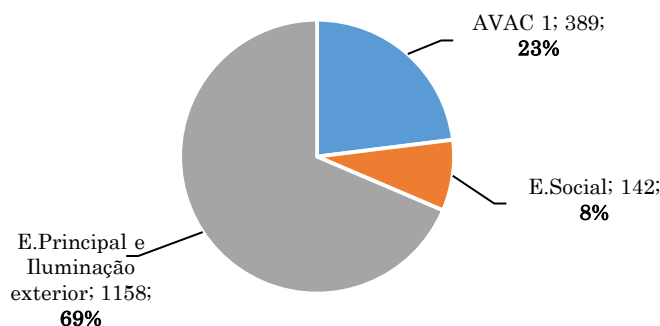


Figura 37 – Desagregação dos consumos diários de energia ativa no dia 28-07-2015 [kWh].

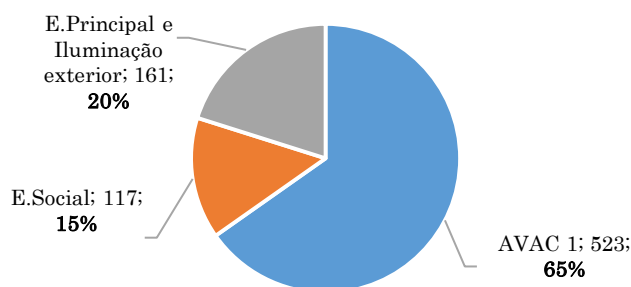


Figura 38 – Desagregação dos consumos diários de energia reativa no dia 28-07-2015 (kVar).

A Tabela 7 mostra os dados registados resultantes da análise aos equipamentos

individualmente.

Tabela 7 – Dados dos equipamentos do sistema AVAC.

Equipamento	<i>Chiller</i>	Eletrobomba BVC 1	Eletrobomba BVC 2	Eletrobomba BF 1	Ventilador UTA 6*
$P$ [kW]	42,40	4,58	4,35	7,35	2,58
$Q$ [kVAr]	59,19	6,14	6,06	6,99	4,78
$S$ [kVA]	72,82	7,66	7,46	10,15	5,43
$V$ [V]	232,10	234,00	234,20	238,00	240,70
$I$ [A]	104,30	10,95	10,60	14,19	7,4
$fp$	0,9 ind	0,59 ind	0,58 ind	0,72 ind	0,47 ind

\*A UTA 6 faz parte do sistema AVAC, no entanto é alimentada pelo Quadro AVAC 3.

Note-se a predominância do *chiller* face aos outros equipamentos. Na Figura 39 pode-se visualizar o peso de cada equipamento do sistema térmico referente ao trânsito de energia reativa. A UTA 6, apesar de alimentada pelo quadro AVAC 3, aparece na figura, uma vez que se trata de um equipamento do sistema térmico.

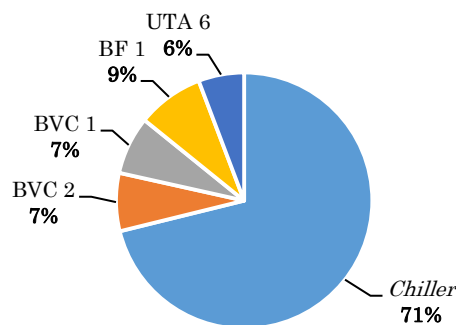


Figura 39 – Desagregação da potência reativa, em percentagem, do sistema AVAC.

A Tabela 8 mostra os dados recolhidos nos pisos do edifício principal. O carácter capacitivo de todos os pisos, com exceção do piso -2, justifica-se pelas cargas eletrónicas existentes (componentes eletrónicos) e pelas características das luminárias, mencionadas no subcapítulo das cargas elétricas mais relevantes. O piso -2 apresenta um fator de potência com carácter fortemente indutivo, devido ao mau funcionamento do sistema de compensação incorporado em cada luminária.

Tabela 8 – Dados dos pisos do edifício principal.

Quadros parciais	<i>P</i> [kW]		<i>Q</i> [kVar]		<i>V</i> [V]		<i>I</i> [A]		<i>fp</i>	
	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
-2.1	8,53	23,27	3,83	26,58	233,7	233,0	13,39	50,78	0,90 ind	0,65 ind
0.1	12,64	7,58	0,89	-0,37	233,7	239,0	18,34	10,85	0,97 ind	0,97 cap
1.1	22,36	14,97	-4,69	-4,18	235,3	238,0	33,31	21,10	0,97 cap	0,95 cap
2.1	12,65	4,17	-2,51	-2,15	234,2	239,2	18,19	6,54	0,98 cap	0,88 cap
3.1	11,90	7,91	-2,26	-1,54	234,0	238,9	17,05	11,09	0,98 cap	0,97 cap

Relativamente à Litoteca, no piso -2, construiu-se um esquema para perceber quantas luminárias existiam por ramal e registou-se os dados dos circuitos e as características dos cabos de alimentação dos mesmos. Na Tabela 9 apresentam-se os valores registados em cada caixa de derivação. Para melhor compreensão, no Anexo II encontra-se o esquema de iluminação, a descrição dos valores de consumo de cada luminária (obtidos através de um ensaio realizado em laboratório) e a densidade de corrente de referência para as secções dos cabos de alimentação do sistema de iluminação.

Tabela 9 – Dados do sistema de iluminação da Litoteca (piso -2).

Caixa de derivação	A	B	C	D	E	Ramal 6	F	G
<i>P</i> [W]	884	924	1.222	1.189	1.805	754	2.425	2.543
<i>Q</i> [Var]	954	1.538	2.038	1.325	2.695	1.083	2.722	3.764
<i>S</i> [VA]	1.321	1.804	2.393	1.805	3.275	1.332	3.702	4.585
<i>V</i> [V]	230	231	231	229	230	234	220	226
<i>I</i> [A]	5,8	7,8	10,4	7,9	14,2	5,6	16,8	20,3
<i>fp</i>	0,67 ind	0,51 ind	0,51 ind	0,66 ind	0,55 ind	0,57 ind	0,66 ind	0,56 ind

Verificou-se uma proximidade aos limites impostos pelas RTIEBT dos valores de corrente que percorrem os cabos de alimentação (com secção de 2,5 mm<sup>2</sup>) das caixas de derivação F e G. Admitindo que todas as luminárias desses ramais se encontravam sem defeitos, os limites de densidade de corrente seriam excedidos quando, por motivos de degradação do material, comesçassem a surgir problemas (por exemplo, um arrancador entrasse em curto-circuito). Como explicado no Anexo II, as caixas A e C eram alimentadas por cabos com secção de 1,5 mm<sup>2</sup>, os quais apresentavam o isolamento em mau estado de conservação, devido à densidade de corrente que os percorria. Pôde-se verificar também um baixo fator de potência em todos os ramais, justificado pela degradação do sistema de compensação incorporado em cada

luminária.

### 6.4.2 Estratégia e locais de intervenção

De acordo com o regime de exploração de baterias de condensadores descrito no capítulo 5, o objetivo consistiu na redução do trânsito de energia reativa ao longo dos cabos de alimentação da instalação elétrica e, caso existissem condições técnicas, na utilização de determinados pontos para instalar uma potência reativa que permitisse obter um nível de afetação tal que compensasse o trânsito de energia reativa proveniente de outros pontos não sujeitos a intervenção. Neste sentido, a Figura 40 mostra um esquema simplificado dos cinco locais da instalação elétrica do *Campus* intervencionados e das respetivas tarefas realizadas.

Segundo a formulação descrita no capítulo 5, o nível de afetação ( $\lambda$ ) depende das características das cargas ligadas a jusante de cada quadro parcial. Assim, a potência reativa ( $Q$ ) com carácter capacitivo instalada em cada ponto da instalação teve em conta vários critérios, as características técnicas de cada ponto, a possibilidade de implementação dos sistemas de compensação e o benefício que o mesmo iria trazer à instalação.

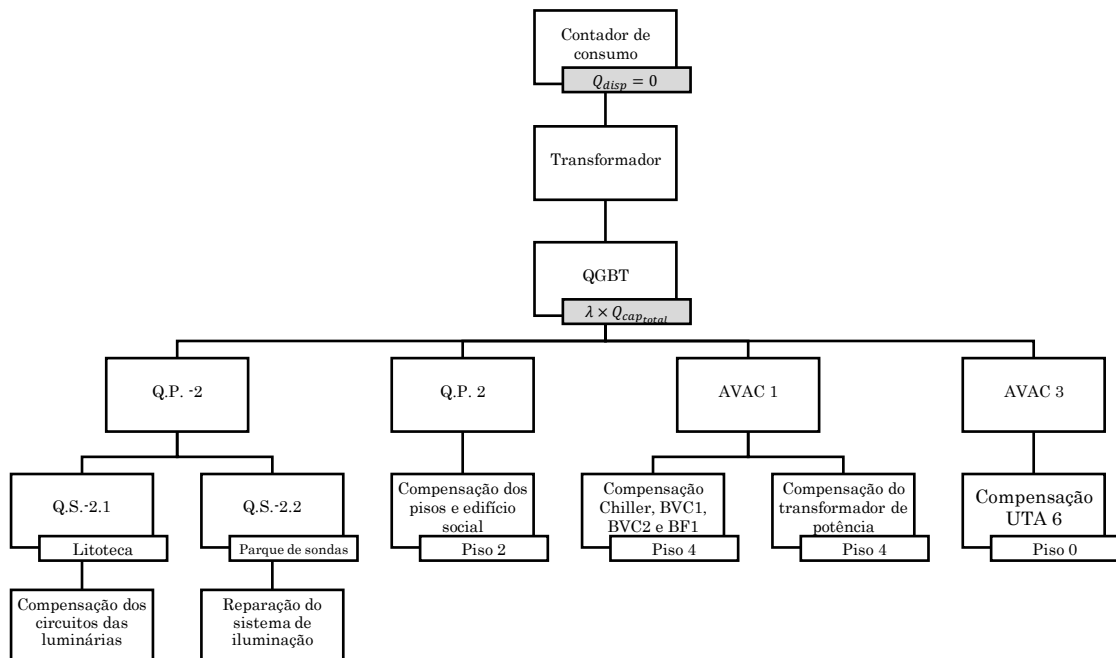


Figura 40 – Esquema dos locais da instalação elétrica intervencionados e tarefas realizadas.

Em primeiro lugar, foram compensadas as cargas consideradas importantes no ponto de vista do trânsito de energia reativa, nomeadamente, o *chiller*, as eletrobombas que

compunham o sistema AVAC (BVC 1, BVC 2 e BF) e o ventilador da UTA 6. Estas eram responsáveis por, aproximadamente, 65% da energia reativa com carácter indutivo do *Campus*.

A intervenção no parque de sondas, no piso -2, teve como finalidade a recuperação do sistema de iluminação, uma vez que o mesmo não cumpria com os requisitos mínimos de iluminação. O sistema de iluminação, constituído por fluorescente de 58 W, apresentava um carácter fortemente indutivo, devido ao estado de degradação dos condensadores existentes em cada luminária. A recuperação deste sistema de compensação mostrava-se complexa, pelo que foi necessário ter em consideração as características deste local aquando da intervenção na litoteca, no mesmo piso.

Também no piso -2, na litoteca, a importância de uma intervenção foi evidente quando se observaram os valores de corrente medidos nos cabos de alimentação das luminárias (Tabela 9). Devido ao elevado estado de degradação de alguns cabos de alimentação, foi necessário, em primeiro lugar, proceder à substituição dos mesmos, para garantir segurança de todo o sistema. Seguidamente, o objetivo passou por proceder à compensação individual das caixas de derivação que alimentam os ramais das luminárias, por forma a contribuir para a redução da corrente que circula nos cabos de alimentação e, conseqüente diminuição das perdas por efeito *Joule*.

O edifício social, apesar dos resultados obtidos mostrarem-se favoráveis à implementação de um sistema de compensação, não sofreu qualquer tipo de intervenção, devido, essencialmente, à impossibilidade de instalação de um sistema de compensação quer junto do quadro de alimentação do próprio edifício, quer no ponto de ligação ao quadro Q.G.B.T. 2, no interior do PT. Por outro lado, o piso 2 – apesar do seu carácter capacitivo, que compensa grande parte do trânsito de energia reativa dos restantes pisos do edifício principal, como se pode visualizar no gráfico da Figura 36 – apresentava condições técnicas que permitiam a instalação de um banco de condensadores. Este local foi, então, utilizado para proceder à compensação do trânsito de energia reativa do edifício social.

O transformador de potência da instalação é um dos equipamentos de grande influência no trânsito de energia reativa, pelo que se considerou importante a sua compensação. Como se trata de um equipamento indispensável ao funcionamento do LNEG – o acesso ao mesmo e a interrupção do serviço requer autorizações especiais – foram admitidos, para dimensionamento do banco de condensadores, os valores



reportados em relatório elaborado no âmbito de um ensaio realizado ao transformador de potência da instalação em 2014. Segundo o respetivo relatório, o transformador apresentava um fator de potência consideravelmente baixo, de 0,57. Segundo a mesma fonte, para uma carga com potências de 40 kW e 12 kVAr no secundário, registou-se um valor de 58 kVAr no circuito primário do transformador, o que levou a concluir que o mesmo apresentava, no mínimo, uma potência reativa de 46 kVAr a operar no período diurno, uma vez que o ensaio foi realizado praticamente em vazio (Casaleiro & Baêta, 2014). Assumindo estes valores como referência, considerou-se importante proceder à compensação do equipamento em questão. O banco de condensadores foi instalado junto do Quadro AVAC 1 (piso 4), uma vez que o mesmo apresentava condições técnicas<sup>7</sup> que permitiam garantir a segurança da instalação.

### 6.4.3 Implementação

Considerando que um dos objetivos do trabalho realizado foi o estudo comportamental do sistema de compensação proposto, a implementação do mesmo foi de cariz experimental. Pelo que, após retiradas conclusões, ficaria sujeito à implementação definitiva, de acordo com as regras técnicas para instalações elétricas em baixa tensão.

#### 6.4.3.1 Recolha e análise do material existente no *Campus*

Tendo em conta a atual crise económica e financeira que o País atravessa, a disponibilidade monetária para investir em projetos de elevado valor é reduzida, pelo que se considerou importante a valorização do material existente no *Campus*.

Por forma a garantir o bom funcionamento dos sistemas implementados, procedeu-se à análise do material que compunha o antigo sistema de compensação que se encontrava no PT.

O primeiro passo consistiu em desmantelar o armário que se encontrava equipado com os elementos descritos na Figura 41.

---

<sup>7</sup> O Quadro AVAC 1 e o respetivo cabo de alimentação, à data da realização dos trabalhos, operavam a um terço da potência para os quais foram projetados, pelo que, atualmente encontram-se sobredimensionados.

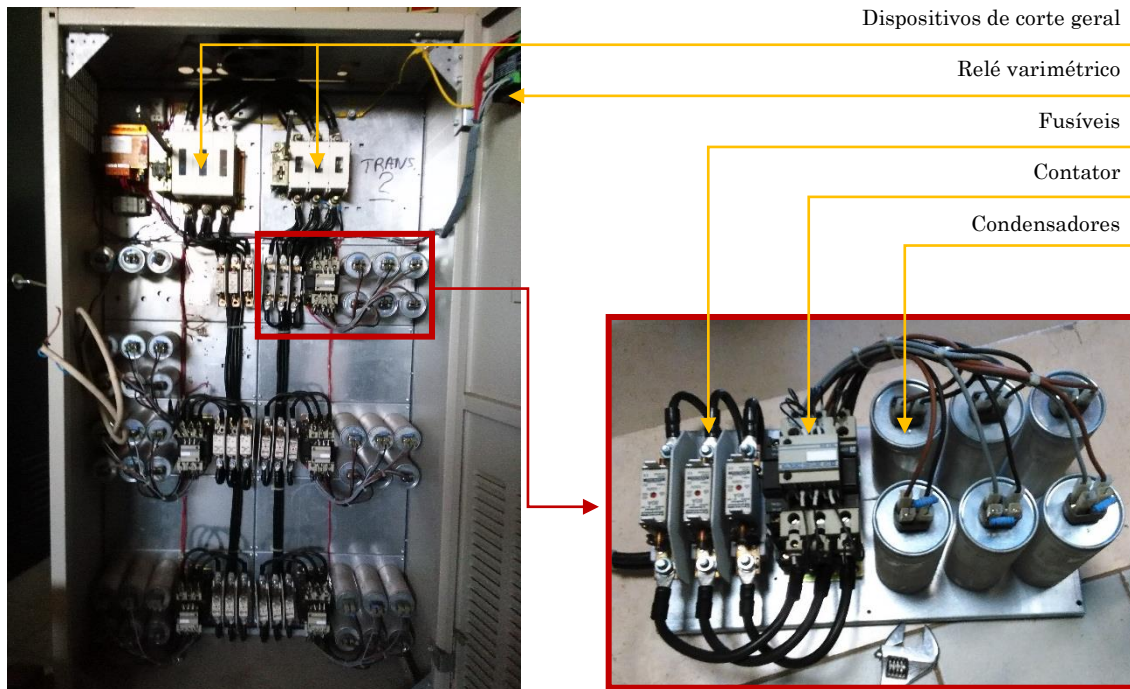


Figura 41 – Armário (esquerda) e escalão (direita) de compensação.

Para testar o estado de conservação dos condensadores, foi montado um pequeno circuito com um disjuntor e um contator, Figura 42. Os condensadores encontravam-se em bom estado, na medida em que, quando sujeitos a uma tensão imposta de 230 V, originavam uma corrente no circuito próxima dos 14 A.

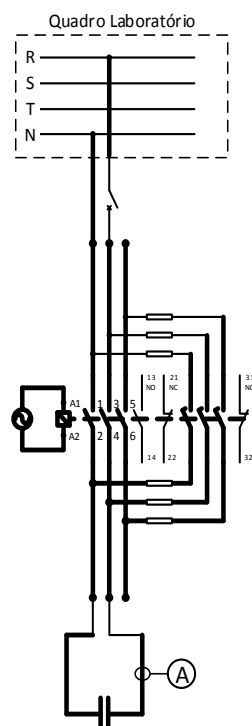


Figura 42 – Esquema do circuito para teste dos condensadores (esquerda). Teste aos condensadores (direita).

Num total de 60 condensadores analisados, 36 apresentavam características que indicavam o seu bom estado de conservação.

Tipicamente, os contadores utilizados nos sistemas de compensação têm características especiais, entre as quais, os contactos que são revestidos por material mais resistente, que possibilita um maior número de manobras sem sofrerem danos relativos pelos efeitos causados por picos de corrente,  $i_c = C dV/dt$ . Este motivo justifica o bom estado de conservação dos contadores do antigo sistema.

No âmbito de outras intervenções realizadas no sistema elétrico do *Campus*, foram recolhidos e conservados vários dispositivos, tais como, disjuntores magneto-térmicos, disjuntores diferenciais, entre outros, que se evidenciaram importantes para o projeto em questão. No entanto, foi necessário adquirir os cabos de alimentação do sistema, buçins, olhais, ponteiras e todos os componentes de *bricolage*: parafusos, porcas, buchas, entre outros.

#### 6.4.3.2 Quadro AVAC 1

A potência da bateria de condensadores a instalar junto de cada carga alimentada pelo quadro AVAC 1 foi definida de acordo com os dados recolhidos inicialmente (reportados na Tabela 7) e pelas características dos condensadores recuperados do antigo sistema de compensação, Tabela 10. A potência desejada para os sistemas individualmente foi obtida pelo número de condensadores utilizados, a combinação série/paralelo dos mesmos e a ligação estrela/triângulo do banco.

Tabela 10 – Potência do banco de condensadores das cargas alimentadas pelo quadro AVAC 1.

Equipamento	$Q$ [kVar]	Nº condensadores	$Q_{cond}$ [kVar]	Tipo ligação	$Q_{cap}$ [kVar]
<i>Chiller</i>	59,19	7*	6,66 + 32,00	Triângulo	72,00
BVC 1	6,14	3	2,10	Estrela	6,30
BVC 2	6,06	3	2,10	Estrela	6,30
BF 1	6,99	3	1,20	Estrela	3,60

\*Foram utilizados seis condensadores de 6,66 kVar ligados em triângulo e um banco de condensadores blindado com 32 kVar.

O sistema de compensação responsável por suprir o trânsito de energia reativa provocado pelo transformador teve como base de dimensionamento os valores obtidos no relatório supra indicado. De acordo com o mesmo, o transformador apresentou uma potência reativa com carácter indutivo de 46 kVar para as condições dos ensaios realizados. Em condições normais de funcionamento, o equipamento ficava sujeito a

uma potência de operação superior, pelo que se considerou a possibilidade de instalar duas baterias de condensadores com 40 e 20 kVAr. Tendo em conta que se trata de uma potência reativa com carácter capacitivo de elevado valor, ponderou-se a instalação de um relógio de comando manual que atuava em função do horário programado pelo operador. Este tinha como objetivo comutar o sistema, através de contatores, de forma a operar nos períodos horários de ponta e cheia (períodos nos quais existe penalização de energia reativa de carácter indutivo). Não obstante, o sistema ficou sujeito a um ajustamento da potência após uma primeira análise aos consumos da instalação.

A Figura 43 mostra um esquema dos sistemas de compensação de energia reativa instalados no piso 4.

A bateria de condensadores com 72 kVAr supria as necessidades de potência reativa do *chiller* quando este se encontrava em funcionamento, pelo que era comandada pela gestão do mesmo, Figura 44.

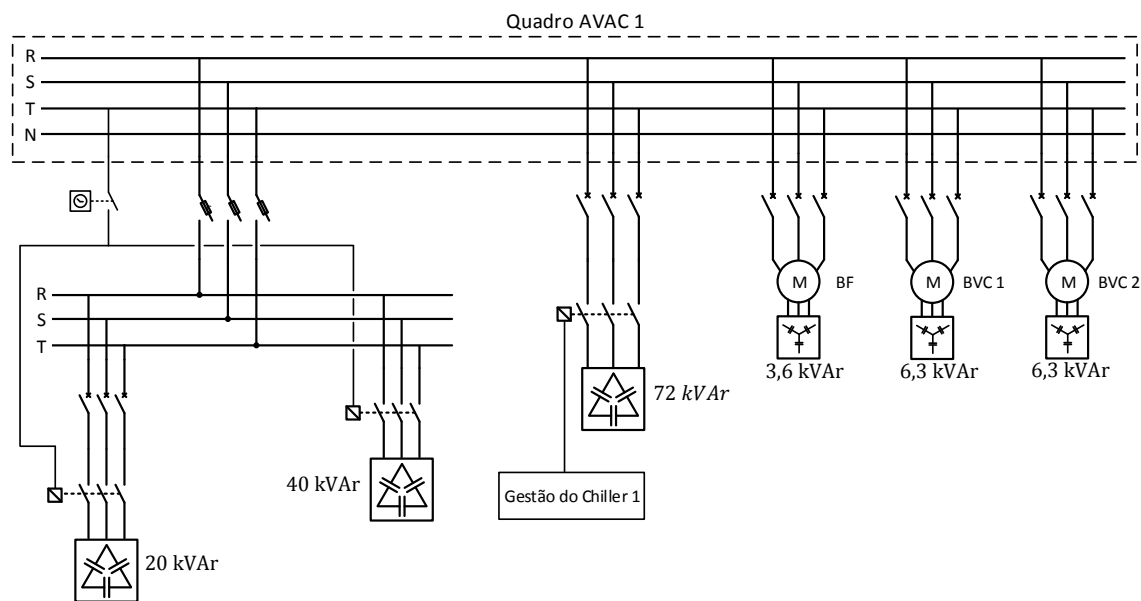


Figura 43 – Esquema de ligação da compensação do piso 4.

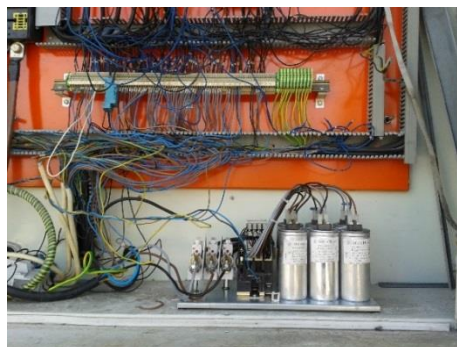


Figura 44 – Bateria de condensadores do *chiller*.

As eletrobombas foram compensadas individualmente com a ligação do banco nas caixas de alimentação das mesmas. A eletrobomba BF foi compensada por uma potência de 3,5 kVar e as eletrobombas BVC por 6,3 kVar, Figura 45.

Mais à esquerda, na Figura 43, encontra-se o sistema de compensação do transformador de potência da instalação. Este foi ligado diretamente ao barramento do quadro AVAC 1, Figura 46.

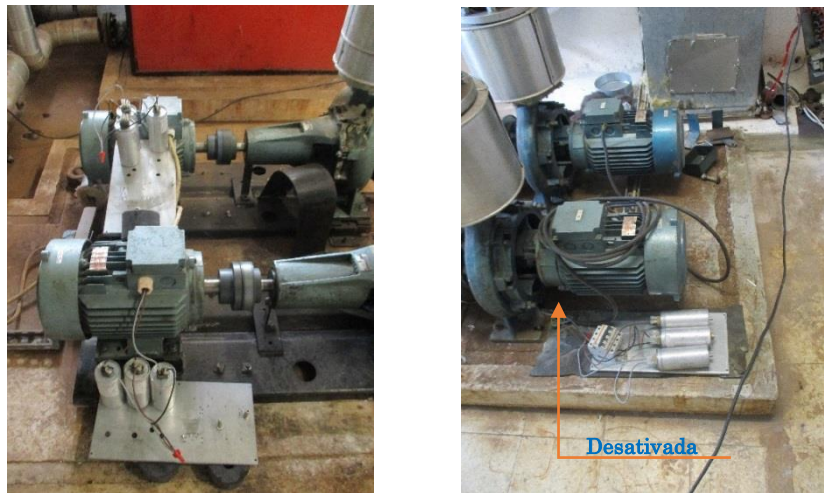


Figura 45 – Sistema de compensação das eletrobombas BVC (esquerda) e BF (direita).

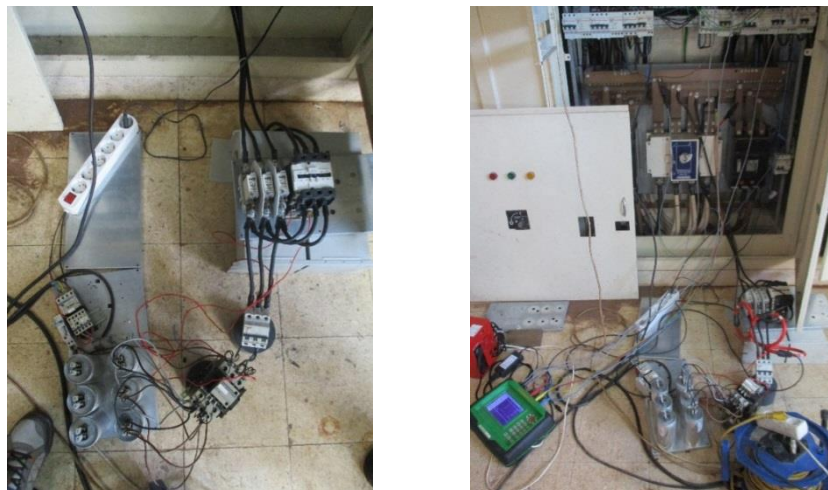


Figura 46 – Sistema de compensação do transformador no piso 4.

### 6.4.3.3 Quadro AVAC 3

O quadro AVAC 3 era responsável por alimentar a UTA 2, UTA 6 e Ventilador 3. Contudo, à data da realização dos trabalhos, encontrava-se ativa somente a UTA 6, pelo que foi o único equipamento sujeito a intervenção, Tabela 11. A UTA 6 era responsável pelo tratamento de ar do auditório, a entrada em funcionamento e o seu perfil de consumo estavam condicionados pelos eventos realizados e o número de pessoas envolvidas. Neste sentido, foi instalado a jusante do quadro de alimentação e gestão do equipamento, um sistema de compensação composto por três condensadores de 3,60 kVAr ligados em estrela.

Tabela 11 – Potência do banco de condensadores da UTA 6 alimentada pelo quadro AVAC 3.

	$Q$ [kVAr]	Nº condensadores	$Q_{cond}$ [kVAr]	Tipo ligação	$Q_{cap}$ [kVAr]
UTA 6	4,78	3	1,20	Estrela	3,60

### 6.4.3.4 Quadro Q.P.2

Inicialmente, no momento da recolha dos dados, o quadro Q.P.2 apresentou uma potência reativa com carácter capacitivo, a qual acabava por compensar o trânsito de energia reativa de carácter oposto proveniente dos quadros dos restantes pisos da instalação. No entanto, o quadro parcial do piso em questão apresentava condições técnicas para instalação de um banco de condensadores, nomeadamente a secção do cabo de alimentação, a distância do PT, o facto de não se encontrar a operar às condições nominais para o qual foi projetado e o espaço para a colocação do sistema. Neste sentido, foi instalado no quadro Q.P.2 um banco de condensadores com o objetivo de compensar o trânsito de energia reativa proveniente do edifício social, uma vez que não existia disponibilidade para o instalar junto da fonte. A potência do banco de condensadores instalado foi dimensionada de acordo com a potência média obtida dos registos efetuados para a análise da situação inicial do *Campus*, Tabela 12.

Tabela 12 – Potência do banco de condensadores para compensação do quadro Edifício Social.

	$Q_{medio}$ [kVAr]	Nº condensadores	$Q_{cond}$ [kVAr]	Tipo ligação	$Q_{cap}$ [kVAr]
Edifício Social	5,00*	3	2,10	Estrela	6,30

\*Potência média calculada com base nos registos reportados na Figura 35.

O sistema de compensação foi montado no interior de um armário que se encontrava de reserva junto do quadro parcial do piso 2, segundo o esquema da Figura 47.



O sistema de compensação foi composto por 3 condensadores e um disjuntor magnetotérmico. Ficou definido que o mesmo não continha um sistema de comando, pelo que permaneceu sempre ligado. Como se trata de um local de passagem e acessível às entidades responsáveis pela gestão do edifício, o sistema foi ligado a um interruptor diferencial com um nível de proteção de 300 mA (disponível no quadro parcial), através de um cabo colocado na esteira que se encontrava na parte superior do quadro parcial, Figura 48.

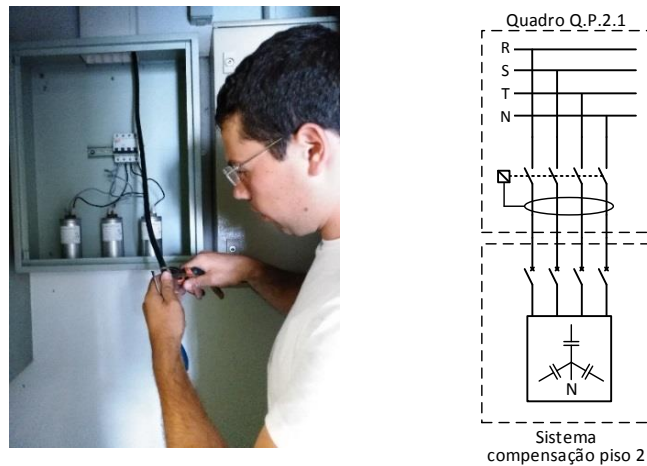


Figura 47 – Esquema e imagem do sistema de compensação do piso 2.



Figura 48 – Instalação do cabo de alimentação do sistema de compensação do piso 2.

#### 6.4.3.5 Quadro Q.P.-2

##### *Quadro Q.S.-2.2 – Parque de sondas*

A iluminação do parque de sondas foi parcialmente recuperada, garantindo, pelo menos, o funcionamento das luminárias responsáveis pela iluminação dos locais de passagem, Figura 49. Apesar de não ter sido possível a recuperação total do sistema, uma vez que determinadas zonas são inacessíveis devido à exposição de maquinaria descontinuada, o nível de luminosidade, após a intervenção, foi considerado aceitável. Tipicamente, os problemas das luminárias encontravam-se relacionados com os defeitos terra devido ao elevado estado de degradação dos balastros ferromagnéticos, o que provocava disparos intempestivos do interruptor diferencial. Foram retiradas as armaduras e substituídos os respetivos balastros por outros com iguais características. Sendo o balastro ferromagnético responsável por originar trânsito de energia reativa de carácter indutivo na instalação, a realização desta intervenção teve prioridade face às restantes, uma vez que as características deste ponto da instalação iriam influenciar os pontos a montante.



Figura 49 – Colocação das luminárias reparadas (esquerda) e iluminação após intervenção (direita).

##### *Quadro Q.S.-2.1 – Litoteca*

Na intervenção realizada à Litoteca, o primeiro passo consistiu em resolver as anomalias encontradas no sistema de iluminação, mais concretamente, substituir o cabo de alimentação das caixas de derivação C e D. Foi colocado um cabo de cinco condutores com secção de  $2,5 \text{ mm}^2$ , permitindo, desta forma, alimentar as duas caixas separadamente, onde a densidade de corrente, em condições normais de funcionamento, para cada circuito era de aproximadamente  $4 \text{ A mm}^{-2}$  (valor que garante uma grande margem de segurança). Para melhor compreensão, o sistema de



iluminação encontra-se esquematizado no Anexo II.

Seguidamente procedeu-se à compensação do fator de potência do sistema de iluminação, tendo como principal objetivo a redução, tanto quanto possível, do valor da corrente nos cabos de alimentação das luminárias. Os condensadores foram colocados junto de cada caixa de derivação e ligados ao cabo de alimentação das mesmas, Figura 50. As potências do banco de condensadores tiveram em conta os valores obtidos após a análise inicial ao sistema, Tabela 13.

Tabela 13 – Potência do banco de condensadores de cada caixa de derivação do sistema de iluminação da Litoteca.

Caixa de derivação	$Q$ [VAr]	Nº condensadores	$Q_{cond}$ [VAr]	Combinação	$Q_{cap}$ [VAr]
A	884	1	2.100	-	2.100
B	1.538	1	2.100	-	2.100
C	2.038	1	2.100	-	2.100
D	1.325	1	1.300	-	1.300
E	2.695	1	2.100	-	2.100
Ramal 6	1.083	2	2.100	2 série	1.050
F	2.722	3	2.100	1    (2 série)	3.250
G	3.764	3	2.100	1    (2 série)	3.250

Nos últimos 3 casos reportados na tabela anterior, os condensadores foram combinados em série e/ou paralelo por forma a obter um fator de potência o mais próximo possível do unitário no respetivo local – o que corresponde ao valor mais baixo de corrente que se consegue atingir. Verificou-se que seria necessário instalar uma potência ligeiramente superior à inicialmente projetada, por forma a compensar todo o trânsito de energia reativa provocado pelo sistema de iluminação, motivo pelo qual foi instalada uma potência reativa consideravelmente superior à necessária na caixa de derivação A.

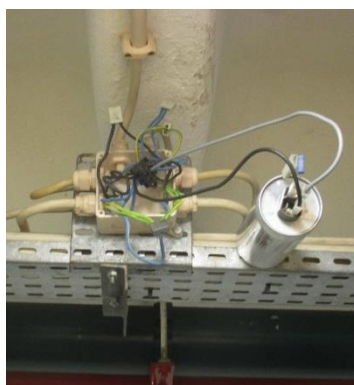


Figura 50 – Compensação do fator de potência do sistema de iluminação da litoteca.

## 6.5 Discussão dos resultados obtidos

De uma forma muito resumida, foi instalada uma potência total de 175,4 kVar distribuídos por 4 pontos da instalação elétrica do *Campus*, valor consideravelmente baixo quando comparado com a potência do antigo sistema de compensação (500 kVar). No Anexo III encontra-se o esquema das instalações elétricas com a descrição dos locais intervencionados.

### 6.5.1 Quadro AVAC 1

Os dados, com e sem sistema de compensação, dos equipamentos do sistema AVAC foram recolhidos, separadamente, no quadro AVAC 1 junto do respetivo disjuntor, Tabela 14. De forma a não existir influência de outras cargas, foi colocado em funcionamento unicamente o equipamento sujeito a teste.

Tabela 14 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção nos equipamentos do sistema AVAC, piso 4.

Equipamento	BVC 1		BVC 2		BF 1		<i>Chiller</i>	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>P [kW]</b>	4,58	4,42	4,35	4,20	7,35	7,26	42,40	33,74
<b>Q [kVar]</b>	6,14	0,73	6,06	-0,81	6,99	3,56	59,19	-15,45
<b>S [kVA]</b>	7,66	4,48	7,46	4,27	10,15	8,09	72,82	37,18
<b>V [V]</b>	234,00	234,20	234,20	234,30	238,00	238,70	232,10	234,20
<b>I [A]</b>	10,95	6,42	10,60	6,10	14,19	11,29	104,30	52,89
<b>fp</b>	0,59 ind	0,99 ind	0,58 ind	0,98 cap	0,72 ind	0,89 ind	0,58 ind	0,90 cap

Como se pode observar pelos dados reportados na tabela anterior, o valor da corrente total diminuiu consideravelmente, cerca de 50 por cento, uma vez que se trata de equipamentos de elevado carácter reativo. Verifica-se também um ligeiro aumento da tensão em todos os equipamentos. Contudo este efeito é mais evidente no *chiller*, pelo facto de ser um equipamento com uma potência elevada, tanto ativa como reativa, o que proporciona uma maior queda de tensão no cabo de alimentação que é atenuada quando se procede à sua compensação. O aumento da tensão junto de cada carga provoca uma diminuição da potência ativa consumida pela mesma.

Consideram-se agora os dados recolhidos no geral do quadro AVAC 1, Tabela 15.

Tabela 15 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no Quadro AVAC 1.

	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
$P$ [kW]	59,91	51,62
$Q$ [kVAr]	74,05	-67,98
$S$ [kVA]	95,28	85,39
$V$ [V]	232,10	236,80
$I$ [A]	136,77	120,10
$fp$	0,63 ind	0,60 cap

Observou-se que o valor da potência ativa sofreu uma descida próxima dos 10 kW, pelos motivos anteriormente referidos. A potência reativa apresentou um valor consideravelmente negativo devido ao sistema instalado (com uma potência aproximada de 60 kVAr) que tinha como objetivo obter um determinado nível de afetação que compensasse o transformador de potência da instalação. Por este motivo, os valores de corrente antes e depois das intervenções apresentavam uma diferença que se considerou pequena face à redução que se obteve junto de cada carga alimentada pelo quadro AVAC 1. No entanto, o valor de corrente após a instalação dos sistemas encontrava-se dentro dos limites máximos admissíveis para o cabo de alimentação do respetivo quadro.

### 6.5.2 Quadro AVAC 3

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos no quadro AVAC 3.

Tabela 16 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no quadro AVAC 3.

	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
$P$ [kW]	2,58	2,49
$Q$ [kVAr]	4,78	1,04
$S$ [kVA]	5,43	2,70
$V$ [V]	240,7	238,80
$I$ [A]	7,4	3,77
$fp$	0,47 ind	0,92 ind

Com o sistema de compensação instalado, conseguiu-se aumentar o fator de potência para 0,92 indutivo. O valor da corrente desceu aproximadamente 3,6 A e, tal como nos equipamentos do sistema AVAC 1, verificou-se um decréscimo do valor da potência ativa.

### 6.5.3 Quadro Q.P.2

O quadro responsável por alimentar o piso 2 apresentava carácter capacitivo antes da instalação do sistema de compensação. No entanto pretendeu-se obter um nível de afetação tal que compensasse o trânsito de energia reativa proveniente do edifício social, visto que, junto do mesmo não foi possível a instalação de um sistema de compensação. A Tabela 17 mostra os resultados obtidos.

Tabela 17 – Valores instantâneos antes e depois da intervenção no quadro Q.P.2.

	Antes	Depois
$P$ [kW]	14,78	14,76
$Q$ [kVar]	-1,05	-7,18
$S$ [kVA]	15,09	16,55
$V$ [V]	233,60	233,70
$I$ [A]	20,58	24,38
$fp$	0,97 cap	0,89 cap

O dimensionamento do sistema de compensação teve como base a média da potência registada na recolha dos dados do Edifício Social (aproximadamente 5 kVar). Desta forma, obteve-se um fator de potência de 0,89 capacitivo, com uma potência reativa negativa de 7,18 kVar. Cerca de 30 por cento desta potência era responsável por suprir as necessidades dos restantes pisos do edifício principal (com exceção do piso -2).

### 6.5.4 Quadro Q.P.-2

A Tabela 18 e a Tabela 19 mostram os resultados obtidos antes e depois da intervenção ao sistema de iluminação da litoteca (piso -2).

Tabela 18 – Valores instantâneos do sistema de iluminação da litoteca (piso -2) antes e depois da compensação (ramal A a D).

Caixa de derivação	A		B		C		D	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
$P$ [W]	884	928	924	934	1.222	1.210	1.189	1.279
$Q$ [Var]	954	-1.041	1.538	-481	2.038	-646	1.325	95
$S$ [VA]	1.321	1.463	1.804	1.120	2.393	1.464	1.805	1.351
$V$ [V]	230	234	231	232	231	232	229	236
$I$ [A]	5,8	6,3	7,8	4,8	10,4	6,3	7,9	5,7
$fp$	0,67 ind	0,63 cap	0,51 ind	0,83 cap	0,51 ind	0,83 cap	0,66 ind	0,95 ind

Tabela 19 – Valores instantâneos do sistema de iluminação da litoteca (pisso -2) antes e depois da compensação (ramal E a G).

Caixa de derivação	E		Ramal 6		F		G	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
$P$ [W]	1.805	1.827	754	770	2.425	2.451	2.543	2.585
$Q$ [VAr]	2.695	664	1.083	-34	2.722	-12	3.764	914
$S$ [VA]	3.275	2.029	1.332	824	3.702	2.603	4.585	2.887
$V$ [V]	230	233	234	234	220	222	226	228
$I$ [A]	14,2	8,7	5,6	3,5	16,8	11,8	20,3	12,7
$fp$	0,55 ind	0,90 ind	0,57 ind	0,94 ind	0,66 ind	0,94 cap	0,56 ind	0,90 ind

De uma forma geral, conseguiu-se uma redução de aproximadamente 60 por cento nos valores de corrente eficaz dos cabos de alimentação das caixas de derivação das luminárias, pelo que se garantiu a conformidade com os parâmetros definidos pelas RTIEBT.

Com uma potência reativa total instalada de 17,25 kVAr, obteve-se um fator de 0,99 capacitivo ( $P = 11.984$  W;  $Q = -541$  VAr) para todo sistema de iluminação.

É possível, como exemplo, obter um valor aproximado das perdas por efeito Joule antes e depois da compensação da energia reativa. Tome-se os valores obtidos na caixa de derivação G e considere-se que a mesma é alimentada por um cabo de 100 m, com uma secção de  $2,5 \text{ mm}^2$  e uma resistividade elétrica do cobre de  $0,0173 \Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$ . Para uma corrente de 20,3 A tem-se uma potência de perdas de 285 W. Após a compensação, o valor da corrente desceu para 12,7 A, o que corresponde a uma potência de 111 W, ou seja, evitou-se 174 W em perdas na alimentação da caixa de derivação G. Replicando os mesmos cálculos para as restantes caixas, a redução das perdas do sistema de iluminação é de aproximadamente 500 W, o que se reflete não só na conservação dos cabos de alimentação como também na diminuição da carga térmica libertada pelos mesmos, que consequentemente está associada aos consumos do sistema de climatização do edifício.

A Tabela 20 mostra os resultados obtidos no quadro parcial do piso -2 antes e depois da intervenção nos sistemas de iluminação da litoteca e parque de sondas. Observou-se que, após as intervenções, a potência reativa de carácter indutivo desceu aproximadamente 13,5 kVAr e o valor eficaz da corrente 9,5 A, o que corresponde a um aumento de 27 por cento no fator de potência após as intervenções. Os resultados obtidos demonstraram que o quadro, no momento da recolha dos dados, alimentava outras cargas para além das intervencionadas, nomeadamente as câmaras frigoríficas de conservação das amostras geológicas com carácter indutivo. Contudo, devido ao perfil de funcionamento das mesmas, considerou-se pouco relevante proceder à sua

compensação.

Tabela 20 – Valores instantâneos do quadro Q.P.-2 antes e depois da intervenção no sistema de iluminação.

	Antes	Depois
$P$ [kW]	23,27	26,04
$Q$ [kVar]	26,58	12,89
$S$ [kVA]	35,38	29,16
$V$ [V]	233,00	233,40
$I$ [A]	50,78	41,32
$fp$	0.65 ind	0.89 ind

### 6.5.5 Análise geral do sistema

Considerando os valores instantâneos reportados nos subcapítulos anteriores, analisa-se agora a situação antes e depois (ou inicial e final, respetivamente) da implementação do sistema de compensação com base na matriz  $M$  do *Modelo Preditor Corretor* e de acordo com a formulação descrita no subcapítulo 5.1.

$$\begin{aligned}
 [M]_{inicial} &= \begin{bmatrix} P_{Q.P.-2} \text{ [kW]} & P_{Q.P.2} \text{ [kW]} & P_{AVAC 1} \text{ [kW]} & P_{AVAC 3} \text{ [kW]} \\ Q_{Q.P.-2} \text{ [kVar]} & Q_{Q.P.2} \text{ [kVar]} & Q_{AVAC 1} \text{ [kVar]} & Q_{AVAC 3} \text{ [kVar]} \end{bmatrix}_{inicial} \\
 &= \begin{bmatrix} 23,27 & 14,78 & 59,91 & 2,58 \\ 26,58 & -1,05 & 74,05 & 4,78 \end{bmatrix}_{inicial} \\
 [M]_{final} &= \begin{bmatrix} P_{Q.P.-2} \text{ [kW]} & P_{Q.P.2} \text{ [kW]} & P_{AVAC 1} \text{ [kW]} & P_{AVAC 3} \text{ [kW]} \\ Q_{Q.P.-2} \text{ [kVar]} & Q_{Q.P.2} \text{ [kVar]} & Q_{AVAC 1} \text{ [kVar]} & Q_{AVAC 3} \text{ [kVar]} \end{bmatrix}_{final} \\
 &= \begin{bmatrix} 26,04 & 14,76 & 51,62 & 2,49 \\ 12,89 & -7,18 & -67,98 & 1,04 \end{bmatrix}_{final}
 \end{aligned}$$

Os resultados mostraram-se favoráveis e de encontro aos objetivos propostos. O valor total de potência reativa com carácter indutivo registado antes das intervenções foi de 104,36 kVar. Após a implementação do sistema de compensação nos referidos pontos da instalação (com uma potência total instalada de 175,23 kVar) o valor total de potência reativa aproximou-se de 61 kVar com carácter capacitivo, sendo este valor próximo da potência reativa do banco de condensadores instalado no quadro AVAC 1, cujo objetivo seria compensar o transformador de potência. Com estes resultados foi possível obter o nível de afetação do sistema e perceber se o mesmo se adequa às necessidades de potência reativa com carácter indutivo dos restantes pontos da instalação. Verificou-se também uma descida de 5 kW no valor total de potência ativa, com maior evidência no quadro AVAC 1, devido ao facto do mesmo alimentar as cargas

mais influentes no trânsito de energia reativa do *Campus*.

Os sistemas instalados com o objetivo de compensar localmente alguns equipamentos eram comandados pelo dispositivo de gestão dos próprios, pelo que representavam uma baixa influência na instalação. Por outro lado, o banco de condensadores responsável por suprir as necessidades do transformador de potência encontrava-se equipado com um relógio de comando, que inicialmente foi programado para ativar o sistema nos períodos fora de vazio. Neste sentido e tendo em conta que o banco de condensadores do quadro Q.P.2 – responsável por suprir as necessidades do edifício social – era o único que se encontrava permanentemente ligado, a instalação apresentava-se com carácter indutivo, motivo pelo qual o sistema de compensação implementado não apresentava qualquer nível de afetação no período noturno. No que diz respeito ao período diurno obteve-se o seguinte nível de afetação:

$$\lambda = \frac{\sum Q_{i,final}}{\sum Q_{i,cap}} = \frac{61 \text{ kVAr}}{175 \text{ kVAr}} = 34,86 \text{ \%}.$$

Este valor significa que cerca de 35 por cento da potência reativa total instalada tinha influência na instalação, a montante dos pontos onde as baterias de condensadores foram instaladas. Seria esta a percentagem responsável por suprir as restantes necessidades de potência reativa com carácter indutivo da instalação do *Campus*.

Como se pôde observar no subcapítulo 6.4.1, o *Campus* apresentava um perfil diário de trânsito de energia reativa irregular, pelo que uma análise às potências instantâneas não seria o suficiente para tirar conclusões acerca do comportamento e da influência do sistema implementado na instalação do *Campus*. Procedeu-se então à recolha de dados junto do quadro geral de distribuição e à comparação dos mesmos com os dados da telecontagem disponibilizados pela concessionária. A Figura 51 mostra o perfil médio diário de potência reativa registado entre os dias 5 e 11 de outubro de 2015 junto do Quadro Geral de Distribuição.

Verificou-se um valor médio de potência reativa com carácter capacitivo próximo do 11 kVAr no período noturno. No período compreendido entre as 7h00 e as 00h15, o valor médio de potência reativa com carácter capacitivo aumentou para próximo dos 49 kVAr – com uma variação entre 40 e 56 kVAr – devido à comutação do sistema de compensação do transformador de potência, comandado pelo relógio de comando manual que se encontrava programado para ativar o sistema no respetivo período.

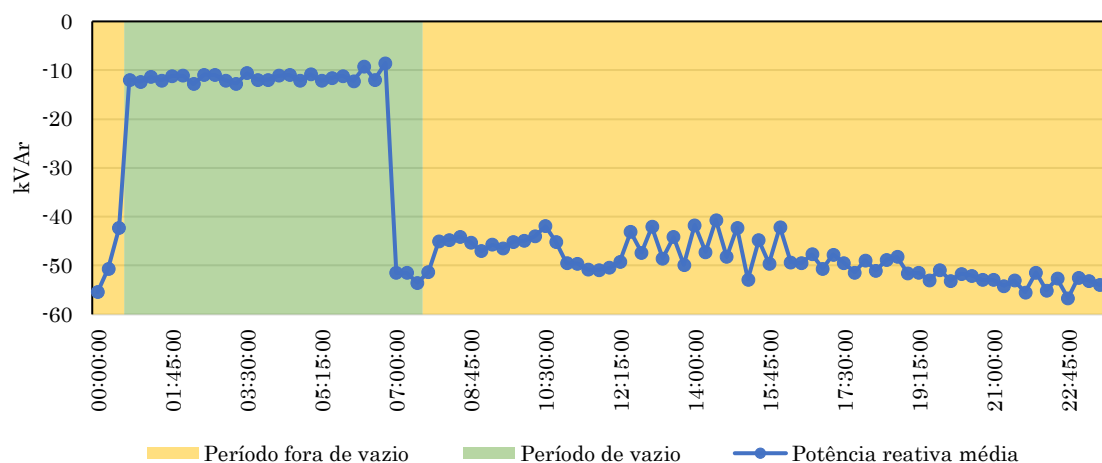


Figura 51 – Perfil médio diário de potência reativa entre os dias 5 e 11 de outubro de 2015 junto do Quadro Geral de Distribuição.

O perfil verificado mostra o típico comportamento dos sistemas de compensação distribuída, isto é, quando se procede à compensação junto das cargas reativas, consegue-se atingir um perfil de potência reativa na instalação com pequenas variações, o que evita a utilização de sistemas automáticos que, devido ao excessivo número de manobras, tem consequências na qualidade de energia elétrica.

A Figura 52 mostra o perfil médio diário de potência reativa com carácter indutivo entre os dias 5 e 11 de outubro registados pelo sistema de telecontagem. Devido à impossibilidade de obter os dados do consumo com os analisadores de rede do lado da média tensão, recorreu-se aos dados de telecontagem fornecidos pela concessionária de energia elétrica. No entanto os mesmos referem-se unicamente aos valores de potência reativa com carácter indutivo, pelo que não foi possível tirar conclusões relativas à potência de carácter oposto junto do contador de consumo.

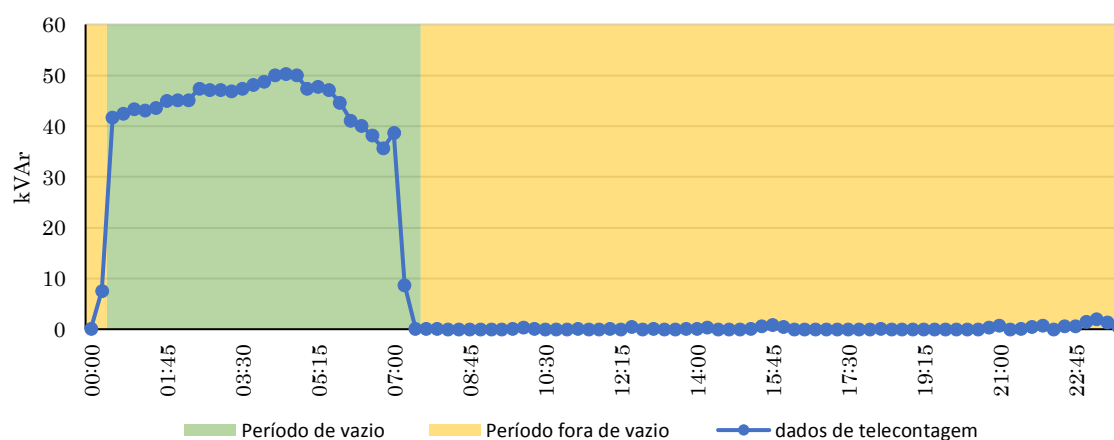


Figura 52 – Perfil médio diário de potência reativa de carácter indutivo entre os dias 5 a 11 de outubro de 2015 registado pelos dados de telecontagem.



No período fora de vazio verificou-se um perfil de potência reativa praticamente constante e nulo, no que diz respeito ao seu valor, pelo que se pôde concluir que, para o mesmo período, o nível de afetação obtido ajustou-se ao trânsito de energia reativa proveniente de todas as cargas reativas da instalação. No período de vazio, o sistema de telecontagem registou um perfil com carácter fortemente indutivo, pelo facto do banco de condensadores do transformador de potência se encontrar desativado. Contudo, o mesmo não teria implicações monetárias para o LNEG, uma vez que não existia penalização de energia reativa de carácter indutivo no respetivo período.

A Figura 53 reporta os valores mensais de energia reativa faturados nos meses considerados de referência (2012 e 2013) e nos quatro meses de 2015 após conclusão da implementação do sistema de compensação. Por motivos estritamente contratuais, não existiu faturação de energia reativa desde janeiro a agosto de 2015.

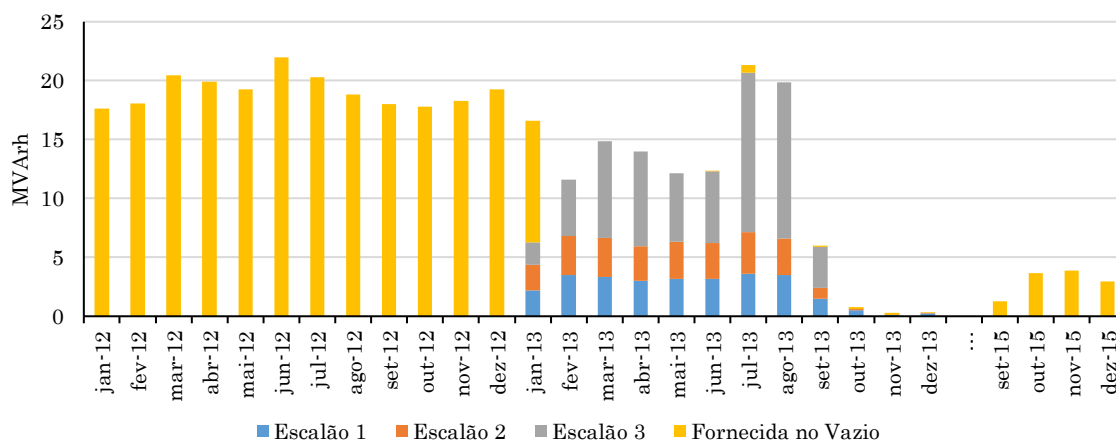


Figura 53 – Evolução dos valores mensais faturados de energia reativa antes e depois da implementação do sistema.

Observou-se uma diminuição significativa dos valores mensais de energia reativa faturados nos meses de 2015 face a igual período do ano de 2012, no qual se encontrava ativo o antigo sistema de compensação. No entanto, verificou-se uma penalização de energia reativa de carácter capacitivo, justificada pela ativação dos grupos de condensadores do transformador de potência ainda no período de vazio, como se pode observar na Figura 52. Devido à dificuldade em sincronizar o relógio de comando com o momento exato da mudança do período horário – definido pelo contador de consumo – este foi programado para comutar o sistema ainda no período de vazio pelo facto de corresponder ao período onde a penalização se mostrava inferior comparativamente ao período fora de vazio. Posteriormente a esta análise, seria possível ajustar o relógio de comando por forma a aproximar da mudança de período horário.

A Figura 54 reporta a percentagem de cada parâmetro da fatura da energia elétrica no período entre setembro e dezembro de 2015.

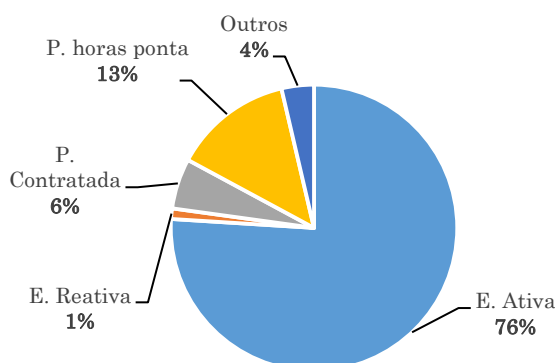


Figura 54 – Custos da energia elétrica por parâmetros faturados entre os meses de setembro e dezembro de 2015 (valores absolutos na versão confidencial).

A percentagem de energia reativa faturada desceu 5 por cento relativamente aos anos de referência, o que representava uma redução de, aproximadamente, 400 € mensais. Os restantes parâmetros da fatura apresentaram diferenças significativas que se deveram a motivos contratuais, pelo que se mostrou difícil tirar conclusões relacionadas com o sistema implementado. Porém sabe-se da sua existência através dos resultados anteriormente discutidos, como seria o caso na energia ativa e na potência tomada em horas de ponta.

## 6.6 Análise financeira

Um dos objetivos do estágio consistiu na definição de estratégias sem investimentos supérfluos. A valorização dos bens existentes no *Campus* teve sempre presente em todas as tomadas de decisão. Por este motivo e pelo facto de se tratar de um estágio não remunerado, o sistema implementado teve um custo real total de 325,00 €, referente à aquisição do material mencionado na Tabela 24, no Anexo IV.

Para efeitos de análise do presente capítulo estimou-se um custo total do sistema de 6.635,00€ (investimento inicial), com base nos custos de aquisição de todo o material, acrescido do valor de mão-de-obra associado à instalação (como reportado na Tabela 25 do Anexo V). Como proveitos, considerou-se unicamente os custos evitados em energia reativa, isto é, 4.800,00€ por ano (400,00€ / mês). Porém, demonstrou-se através da análise dos resultados que o método utilizado comporta outro conjunto de

benefícios tecnicamente aparentes, mas de difícil representação em termos de proveitos, numa perspetiva de análise financeira. Admitiu-se ainda um período de vida útil dos equipamentos de 10 anos e uma taxa de atualização de 2,5%. Na Tabela 21 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 21 – Análise económica da solução implementada, tendo por base valores estimados.

Custos evitados [€/ano]	Custos de investimento inicial [€]	PRI simples [anos]	PRI atualizado [anos]	VAL [€]	TIR [%]
4.800	6.635	1,20	1,24	39.648	83,1

Segundo o “*Manual de boas práticas energéticas*” da Iberdrola, o retorno do investimento para sistemas de compensação com a tipologia comum encontra-se próximo de um ano, podendo variar de acordo com o perfil de trânsito de energia reativa da instalação. Ora, considerando todos os pressupostos da análise financeira realizada, os resultados obtidos mostraram a viabilidade do projeto. Apesar do sistema de compensação defendido apresentar um custo de investimento mais elevado quando comparado com os sistemas tipicamente utilizados – pelo facto de necessitar de mais equipamento face a um sistema centralizado – o período de retorno do investimento obtido aproxima-se do valor tomado como referência para este tipo de projetos. Considerando todas as potencialidades que o método defendido apresenta, é expectável que se consiga períodos de retorno iguais ou até inferiores aos métodos atualmente implementados.



## 7 Conclusão

A presente dissertação defende um método para compensação do fator de potência baseada no princípio de planeamento de afetação de unidades. O método consiste na utilização de vários pontos da instalação para implementação de sistemas de compensação de energia reativa, por forma a compensar outros pontos a montante dos mesmos. Para além de beneficiar de todas as vantagens do método de compensação distribuída, minimiza o impacto causado pela concentração de uma potência reativa de elevado valor num só ponto da instalação.

Os resultados obtidos no âmbito do estágio realizado, onde o objetivo consistia no estudo do comportamento do referido método na compensação da energia reativa do *Campus* LNEG–Alfragide, mostraram as potencialidades do mesmo, no que diz respeito a questões técnicas e financeiras, conduzindo à concretização dos objetivos inicialmente propostos.

Os bancos de condensadores foram instalados juntos das cargas com carácter indutivo onde se observou, através da análise dos parâmetros da rede, uma descida considerável do valor eficaz da corrente que percorria os cabos da alimentação. Desta forma, contribuiu-se para a diminuição das perdas por efeito *Joule* nos cabos de alimentação das respetivas cargas, considerando este fenómeno uma das principais virtudes do método.

A redução das perdas resistivas nos cabos contribuiu para a conservação do seu isolamento e diminuição das cargas térmicas do edifício. Além destes pressupostos benefícios evidenciou-se uma descida dos consumos de energia ativa dos equipamentos intervencionados: a redução do valor eficaz da corrente nos cabos proporciona um ligeiro aumento da tensão junto das cargas, provocado pela diminuição das quedas de tensão.

Foi possível compensar o trânsito de energia reativa do *Campus* através de bancos de condensadores, definindo estratégias que permitiram atenuar os efeitos negativos do conteúdo harmónico. Para além de uma menor necessidade de potência reativa para compensar toda instalação, a mesma foi instalada em vários pontos, pelo que a probabilidade de ocorrência de fenómenos que possam por em causa a continuidade do serviço é reduzida. Por outro lado, a distorção harmónica sofre alguma atenuação ao longo dos cabos da instalação, o que se traduz num menor impacto, no que se refere ao

conteúdo harmónico emitido pelo regime de exploração de baterias de condensadores discutido, quando comparado com o estado da arte.

Foi evidente, nos resultados obtidos, uma diminuição das potências ativa e reativa, que se traduziu na redução dos encargos mensais com energia elétrica. No que diz respeito à análise financeira, o retorno do investimento mostrou um parecer favorável à replicabilidade do método.

Tendo, a metodologia estudada um impacto positivo no que diz respeito à redução dos consumos de energia elétrica de uma instalação, pode-se afirmar que a mesma contribui para uma maior eficiência na utilização dos recursos endógenos e das redes de transmissão.

## 8 Bibliografia

Abreu, A. (2004). *Compensação da energia reativa nas redes de AT/MT*.

ADENE. (26 de 11 de 2015). *Programa ECO.AP*. Obtido de <http://www.adene.pt/programa/programa-de-eficiencia-energetica-para-administracao-publica-ecoap>

Ag. regional de energia e ambiente, Médio Tejo 21. (16 de 04 de 2016). *Diagrama de Sankey de Portugal Continental*. Obtido de <http://www.mediotejo21.net/index.php/pt/2014-08-13-17-57-11/diagrama-de-sankey-energia-primaria>

Agência Europeia do Ambiente. (s.d.). *AEA*. Obtido em 17 de 09 de 2015, de AEA: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/climate/intro>

Agência Portuguesa do Ambiente. (15 de 5 de 2015). PNAC2020.

Casaleiro, Â., & Baêta, S. (2014). *Nova metodologia para a determinação da eficiência de um transformador de potência instalado num Posto de transformação alimentado pela rede de Média Tensão: Caso de estudo do Campus de Alfragide de LNEG*. Alfragide.

Correia, P. J. (2007). *O impacto dos problemas de qualidade de energia em instalações Eléctricas*. Coimbra: Departamento de engenharia elétrica e computadores, FCTUC.

EDP. (2005). *Manual da qualidade de energia elétrica*. Coimbra: Departamento de Engenharia Eletrotécnica Universidade de Coimbra.

EDP Universal. (s.d.). *Contrato de fornecimento de energia elétrica em BTE e MT*.

ERSE. (2010). Despacho n.º 3/2010, Faturação energia reativa.

ERSE. (2013). Regulamento de qualidade de serviço do setor elétrico. *Diário da República, 2.ª série - N.º232*.

ERSE. (13 de 10 de 2015). *Ciclo semanal opcional para os consumidores em MAT, AT e MT em Portugal Continental*. Obtido de Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

- ERSE. (s.d.). *Entidade Reguladora dos serviços energéticos*. Obtido em 02 de 10 de 2015, de <http://www.erse.pt/pt/electricidade/qualidadedeservico/qualidadedeservicotecnica/Paginas/Qualidadedaondadetensao.aspx>
- Europeia, Comissão. (17 de 9 de 2015). *Eurostat*. Obtido de Statistics Explained: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_production\\_and\\_imports/pt](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports/pt)
- FEE. (19 de 2 de 2015). Fundo de Eficiência Energética. *Aviso 18 - Redução dos Consumos de Energia Reativa no Estado*.
- Hofmann, W., Schlabbach, J., & Just, W. (2012). *Reactive Power Compensation*. A John Wiley & Sons, Ltd.
- Iberdrola. (2014). *Manual de boas práticas energéticas*.
- II Congresso de Inovação tecnológica em energia elétrica. (2003). *Qualidade de energia elétrica*. Citenel.
- Paiva, J. P. (2011). *Redes de energia eléctrica*. IST Press.
- PNAEE. (2013). Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética. *Diário da República, 1ª série - Nº 70*.
- Pordata. (16 de 04 de 2016). *Base de dados Portugal*. Obtido de Consumo de energia elétrica total: <http://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela>
- QEnergia. (2001). *O impacto dos problemas de qualidade da energia em instalações eléctricas*. Massamá: QEnergia.
- RTIEBT. (2006). Regras técnicas das instalações elétricas de baixa tensão. *Diário da República*, 6682-71.
- Schneider Electric. (01 de 10 de 2015). *Estudos de energia reativa*. Obtido de [http://www.schneiderelectric.pt/sites/portugal/pt/solutions/business\\_segments/energy\\_efficiency/estudo\\_energia\\_reativa/estudo\\_energia\\_reativa.page](http://www.schneiderelectric.pt/sites/portugal/pt/solutions/business_segments/energy_efficiency/estudo_energia_reativa/estudo_energia_reativa.page)
- Silva, M. d. (2011). *Introdução aos circuitos eléctricos e electrónicos*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.



## Anexo I – Circuitos e consumos das luminárias preponderantes

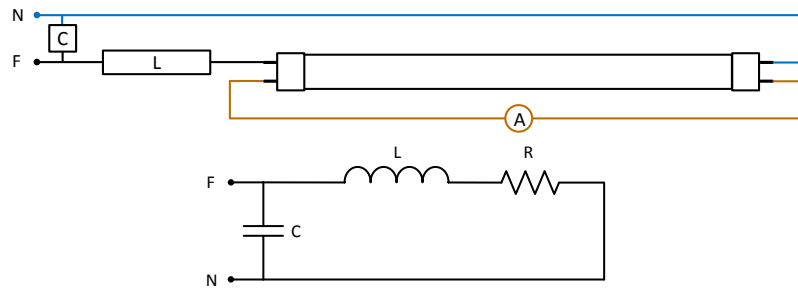


Figura 55 – Esquema das luminárias fluorescentes de 58 e 36 W.

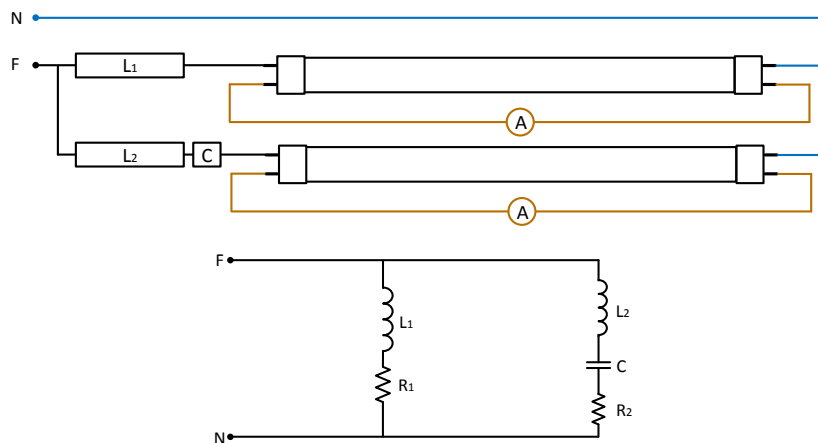


Figura 56 – Esquema do conjunto de duas luminárias fluorescentes de 36 W.

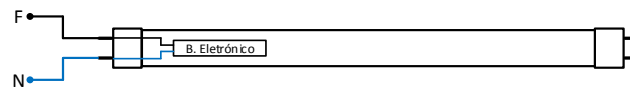


Figura 57 – Esquema elétrico das luminárias EcoTubo.

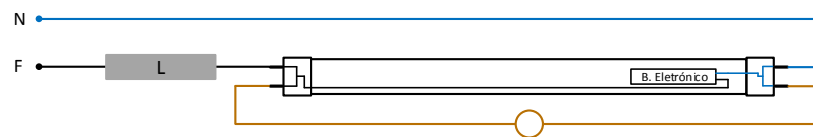


Figura 58 - Esquema das luminárias LED.

Tabela 22 – Dados dos consumos das luminárias.

Descrição	$P$ [W]	$Q$ [Var]	$S$ [VA]	$V$ [V]	$I$ [A]	$FP$	$THD_I$ [%]
1 Fluorescente 36 W sem compensação	49,89	89,33	102,6	236,9	0,43	0,48	11,13
2 Fluorescente 36 W sem compensação	98,00	180,0	205,3	236,6	0,87	0,47	10,66
2 Fluorescente 36 W com compensação	95,33	-40,83	104,0	236,5	0,44	0,91	33,91
2 Fluorescente 36 W com balastro eletrônico	69,33	-16,45	71,33	236,2	0,30	0,97	7,92
1 Fluorescente 58 W sem compensação	75,33	128,6	149,3	236,1	0,63	0,50	11,54
1 Fluorescente 58 W com compensação	71,33	30,86	78,00	236,3	0,33	0,91	39,81
LED	19,03	-5,74	19,87	237,0	0,08	0,95	22,72
EcoTubo	29,56	-6,49	30,27	235,9	0,13	0,97	14,35



## Anexo II – Intervenção no sistema de iluminação da litoteca

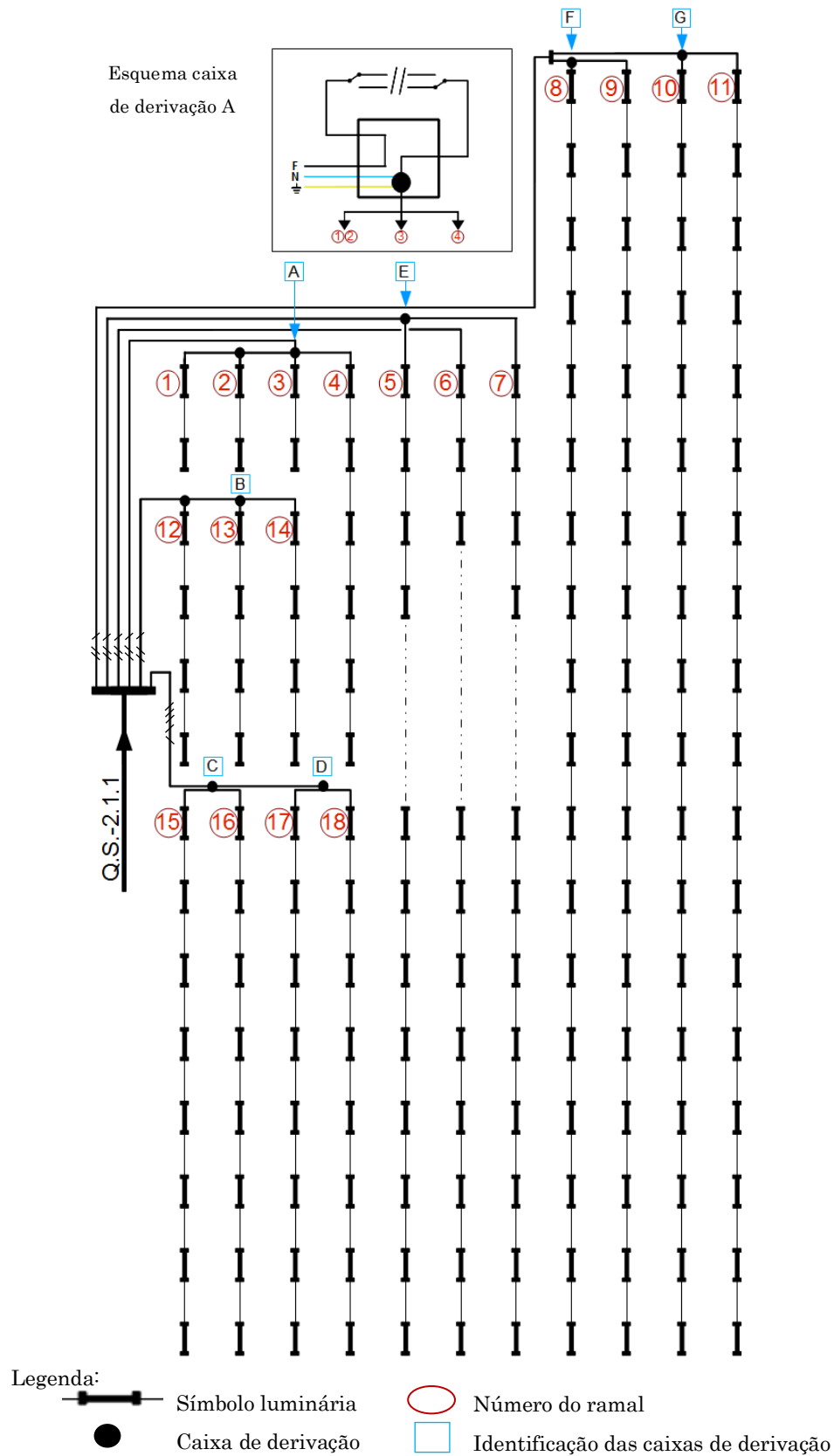


Figura 59 – Esquema de iluminação da Litoteca (piso -2).

## Observações

Os cabos de alimentação das caixas de derivação C e D e o cabo utilizado para o sistema de comutação escada ligado à caixa de derivação A tinham uma secção de 1,5 mm<sup>2</sup>. Eram visíveis os danos no isolamento causados pelo sobreaquecimento, devido à elevada densidade de corrente nos circuitos, Figura 60.

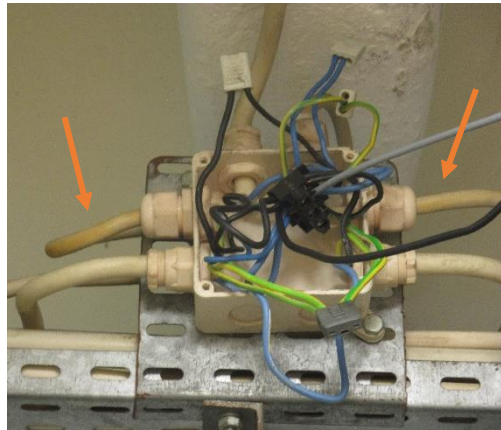


Figura 60 – Cabos com isolamento danificado, caixa de derivação A.

Através de um ensaio em laboratório, verificou-se o consumo de corrente para uma luminária fluorescente de 58 W:

$$I_{\text{lâmpada}} = 0,66 \text{ A.}$$

Caso o arrancador desta se apresente danificado, ou seja, em curto-circuito, o valor eficaz da corrente é:

$$I_{\text{lâmp. def.}} = 1 \text{ A.}$$

Segundo as regras técnicas para instalações elétricas em baixa tensão (RTIEBT), a densidade de corrente máxima admissível para um cabo de cobre tem a ver com o modo instalado e a sua secção. A Tabela 23 mostra os valores de densidade de corrente para os modos de aplicação em causa na presente dissertação.

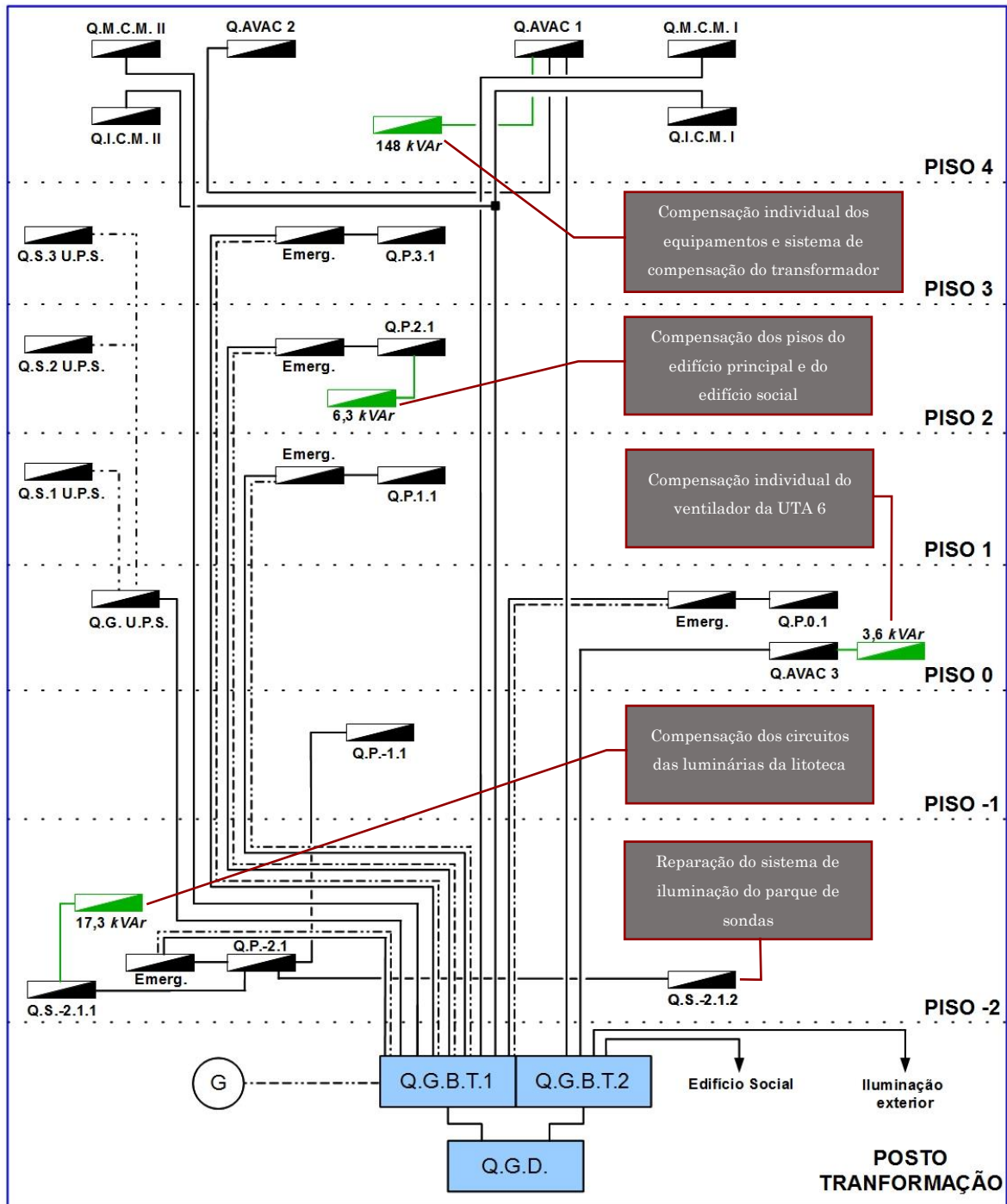
Tabela 23 – Densidade de corrente  $J$  [A mm<sup>-2</sup>] para condutores de cobre com isolamento PVC (RTIEBT, 2006).

Modo de instalação	Secção [mm <sup>2</sup> ]		
	1,5	2,5	4
Cabos multicondutores fixados à parede ou ao teto	11,7	9,6	8,0
Cabos multicondutores em condutas circulares (tubos)	10,0	8,0	6,8
Cabos multicondutores em esteiras perfuradas	12,3	10,0	8,5

De acordo com o TRE, os valores mencionados são consideravelmente elevados, o que contribui para o agravamento das perdas por efeito *Joule* que danificam o isolamento dos cabos, comprometendo a segurança da instalação. Neste sentido, o TRE considera como boas práticas de eficiência energética utilizar uma densidade de corrente de  $4 \text{ A mm}^{-2}$ , no limite máximo de  $6 \text{ A mm}^{-2}$  para o dimensionamento dos cabos de cobre. Observou-se uma densidade de corrente no cabo de alimentação das caixas de derivação C e D de  $12,2 \text{ A mm}^{-2}$ , o dobro face aos valores de referência para a secção em questão. A caixa de derivação A não apresentava uma densidade de corrente que justificasse os danos visíveis,  $3,9 \text{ A mm}^{-2}$ , pelo que se pode concluir que os mesmos terão acontecido antes das alterações realizadas aos circuitos das luminárias em intervenções anteriores.



## Anexo III – Esquema das instalações elétricas após as intervenções



Legenda:

Q.G.D. – Quadro geral de distribuição  
 Q.G.B.T. – Quadro geral baixa tensão  
 Q.P. – Quadro parcial  
 Q.S. – Quadro de serviço

Q.M.C.M. – Quadro dos monta-cargas e elevadores  
 Q.I.C.M. – Quadro iluminação da casa das máquinas

Figura 61 – Esquema das instalações elétricas após as intervenções.





## Anexo IV – Parâmetros para análise financeira

Tabela 24 – Custo real do sistema.

Descrição	Custo total [€]
Cabo de alimentação dos sistemas ( $VV3 \times 6 + 6 + T6$ ) – 50 m	225,00
Material de bricolage (parafusos, porcas, buchas, etc.)	50,00
Material elétrico (bucins, caixas de junção, fita termoretrátil, etc.)	50,00
<b>Total</b>	<b>325,00</b>

Tabela 25 – Tabela de preços para a estimativa de custo.

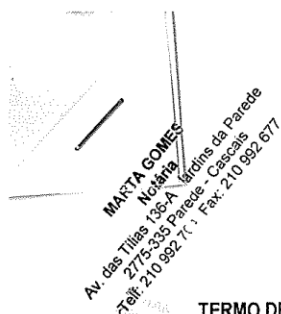
Descrição	Quantidade	Custo total <sup>1</sup> [€]
Condensador 60 kVAr 450 V	1	459,65
Condensador 40 kVAr 450 V	1	306,21
Condensador 20 kVAr 450 V	1	171,47
Condensador 12 kVAr 450 V	1	107,38
Condensador 7,5 kVAr 450 V	4	382,68
Condensador 3 kVAr 450 V	7	489,30
Contator 95A 40 kVAr	1	242,37
Contator 43A 20 kVAr	1	143,15
Contator modular 20 A	1	23,09
Disjuntores magneto térmicos tetrapolares 16 A	6	94,44
Disjuntores magneto térmicos tripolares 63 A	2	73,90
Disjuntores magneto térmicos tripolares 32 A	1	19,24
Seccionadores de fusíveis	3	15,60
Fusíveis	3	25,83
Interruptor Horário digital	1	53,52
Cabo $VV3 \times 6 + 6 + T6$ (m)	100	449,00
Armário metálico (1000x800x300)	1	471,37
Armário metálico (400x400x200)	7	826,35
Armário metálico (300x250x200)	8	599,20
Material elétrico	1	100,00
Material bricolage	1	50,00
<b>Subtotal</b>		<b>5.103,75</b>
<b>Mão-de-obra<sup>2</sup></b>		<b>1.532,00</b>
<b>TOTAL</b>		<b>6.635,75</b>

<sup>1</sup>Os preços foram retirados dos catálogos da marca *Chint* e *General Cable*.

<sup>2</sup> Considerou-se 30% sobre o valor total do equipamento.



## Anexo V – Termo de responsabilidade do autor do projeto de alterações de eletricidade.



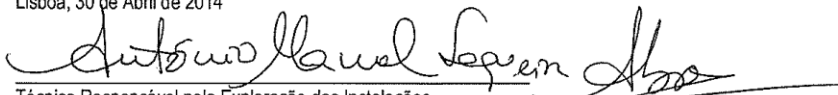
### TERMO DE RESPONSABILIDADE DO AUTOR DO PROJECTO DE ALTERAÇÕES DE ELETRICIDADE

António Manuel Sequeira Abreu, morador na rua Pedro Sintra lote 90 – 4º esquerdo, 2580 – 495 Carregado, contribuinte n.º 181478196, inscrito na Ordem dos Engenheiros sob o n.º 55372, **declara**, para efeitos do disposto no n.º 1 do artigo 10º do Decreto-Lei n.º 555/99, de 16 de Dezembro, na redacção que lhe foi conferida pela Lei n.º 60/2007, de 4 de Setembro e Decreto-Lei n.º 26/2010 de 30 Março, que o projeto de alterações de instalações elétricas e eletromecânicas de que também dependem as instalações de água, gás, CCTV, comunicações, AVAC e de segurança, de que é autor, relativo à obra de reparação, beneficiação e rentabilização energética e de promoção de eficiência ambiental, em curso nas instalações do campus do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, sediado na Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, apartado n.º 7586, Alfragide, 2610 – 999 Amadora, cujo licenciamento foi requerido por esta entidade, encontra-se em fase de implementação e:

- 1) Observa a comunicação prévia com referências n.º 3831, 7173, 4825, 2627, remetidas ao Gabinete da Ministra de Estado e das Finanças, Direção Geral de Energia, Ministério da Economia, Gabinete do Ministro das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, respetivamente, em 14 de Março de 2003, e ao Gabinete do Ministro da Defesa Nacional em 3 de Março de 2003, respeitantes ao projeto CPE n.º 56760;
- 2) Observa as normas legais e regulamentares aplicáveis e a filosofia de projeto de arquitetura, bem como das peças que o compõem e no que, em matéria de segurança das pessoas, das instalações e dos equipamentos, diz respeito;
- 3) Visa a reparação e o funcionamento dos sistemas técnicos ali existentes e a obtenção da promoção da eficiência energética através da redução dos consumos de energia elétrica, de água e de gás sem prejuízo no normal funcionamento do serviço;
- 4) Não observa, em situações específicas, o cumprimento de normas técnicas em vigor, ao abrigo do disposto no n.º 5 do artigo 10º do Decreto - Lei n.º 555/99, de 16 de Dezembro, na redacção que lhe foi conferida pela Lei n.º 60/2007 de 4 de Setembro, com o fundamento de experimentação e teste de metodologias e de soluções sem regulamentação específica, mas em ambiente de I&D.

Mais declara que assume, para os efeitos legalmente previstos, a responsabilidade técnica pela autoria das conceções adotadas, salvo se as mesmas forem modificadas por terceiros sem o seu consentimento.

Lisboa, 30 de Abril de 2014

  
Técnico Responsável pela Exploração das Instalações  
Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (IST)  
Sustainable Energy Systems, MIT Doctoral Program Student

2.

**CARTÓRIO NOTARIAL  
DE**

**MARTA ISABEL RIBEIRO GOMES**

**NOTÁRIA**

AVENIDA DAS TÍLIAS Nº 136-A - JARDINS DA PAREDE

2775-335 PAREDE - CASCAIS

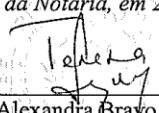
TEL: 210992704 - FAX: 210992677

E-MAIL: geral@mgnotariocascais.com.pt

WEB: www.mgnotariocascais.com.pt

Reconheço a assinatura no documento anexo, que é um *Termo de Responsabilidade*, de **ANTÓNIO MANUEL SEQUEIRA ABREU**, feita pelo próprio, na minha presença, pessoa cuja identidade verifiquei pela exibição do bilhete de identidade com o n.º7732687, emitido em 28.06.2005, pelos Serviços de identificação Civil de Lisboa. ---  
Parede, 30 de Abril de 2014

*A Colaboradora autorizada  
por delegação da Notária, em 2 de Setembro de 2013,*

  
Teresa Alexandra Bravo Rocha Sequeira  
(Ordem dos Notários n.º 410/3)

Conta Registada sob o n.º 2100/2014

